

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON
Année scolaire 1930-1931. — N° 172

ÉTUDE PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE
DES
COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS

APPLICATIONS CLINIQUES

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Et soutenue publiquement le 2 Juillet 1931

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

par

Paul PONTIUS

Moniteur de Physique biologique à la Faculté de Médecine
Interne et Lauréat des Hôpitaux
(Prix Ste-Ollive 1924)

né à Mâcon (Saône-et-Loire), le 21 Novembre 1904.



Imprimerie de Trévoux
G. Patissier.

1931

ÉTUDE PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE
DES
COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS

APPLICATIONS CLINIQUES

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON
Année scolaire 1930-1931. — N° 172

ÉTUDE PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE
DES
COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS

APPLICATIONS CLINIQUES

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Et soutenue publiquement le 2 Juillet 1931

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

par

Paul PONTIUS

Moniteur de Physique biologique à la Faculté de Médecine
Interne et Lauréat des Hôpitaux
(Prix Ste-Ollive 1924)

né à Mâcon (Saône-et-Loire), le 21 Novembre 1904.



Imprimerie de Trévoux
G. Patissier.

1931

PERSONNEL DE LA FACULTÉ

Doyen honoraire	M. L. HUGOUNENQ
Doyen	M. J. LÉPINE
Assesseur	M. ROLLET

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. CAZENEUVE, ROQUE, LANNOIS, HUGOUNENQ, ROCHET, BARRAL

PROFESSEURS

MM.

Cliniques médicales	PIC
Cliniques chirurgicales	PAVIOT
Clinique obstétricale et accouchements	TIXIER
Clinique ophtalmologique	BERARD
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques	VORON
Clinique neurologique et psychiatrique	ROLLET
Clinique des maladies des enfants	NICOLAS
Clinique des maladies des femmes	LÉPINE (J.)
Clinique d'oto-rhino-laryngologie	MOURIQUAND
Clinique des maladies des voies urinaires	VILLARD
Clinique chirurgicale, infantile et orthopédie	COLLET
Physique biologique, radiologie et physiothérapie	GAYET
Chimie biologique et médicale	NOVÉ-JOSSERAND
Chimie organique et toxicologique	CLUZET
Matière médicale et botanique	FLORENCE
Parasitologie et Histoire naturelle médicale	MOREL
Anatomie	X,
Histologie	GUIART
Physiologie	LATARJET
Pathologie interne	POLICARD
Pathologie externe	DOYON
Pathologie et thérapeutiques générales	FROMENT
Anatomie pathologique	VALLAS
Chirurgie opératoire	CADE
Médecine expérimentale et comparée et bactériologie	FAVRE
Médecine légale	PATEL
Hygiène	ARLONG (F.)
Thérapeutique	ETIENNE MARTIN
Pharmacie	COURMONT (P.)
Hydrologie, thérapeutique et climatologie	SAVY
	LEULIER
	PIÉRY

PROFESSEUR TITULAIRE SANS CHAIRE

Chargé d'un cours de Propédeutique et gynécologie M. CONDAMIN

CHARGÉS DE COURS COMPLÉMENTAIRES

Anatomie topographique	MM.	THÉVENOT (Léon)
Puériculture et hygiène de la première enfance		RHENTER
Chirurgie expérimentale		TAVERNIER
Applications du radium		NOGIER
Stomatologie		TELLIER

AGRÉGÉS

MM. NOGIER	MM. CHALIER (Joseph)	MM. MARTIN (Joseph)	MM. CHAMBON
ROCHAIX	NOEL	ROCHET (Pb.)	CIBERT
RHENTER	DUMAS	WERTHEIMER	EPARVIER
MAZEL	DUFOURT	GATÉ	GUILLEMINET
SANTY	DEVIC	BERNHEIM	MORENAS
CHALIER (André)	GABRIELLE	DECHAUME	ROCHE
	MANCEAU	POLLOSSON	REBATTU ch.

M. BAYLE, Secrétaire.

EXAMINATEURS DE LA THÈSE

M. CLUZET, Président ;

Assesseurs : MM. PATEL, NOGIER, DECHAUME.

La Faculté de Médecine de Lyon déclare que les opinions émises dans les dissertations qui lui sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'elle n'entend leur donner ni approbation ni improbation.



A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE

*Je dois tout à son dévouement
incessant et à ses sacrifices ; elle
seule peut savoir la dette de reconnaissance
que j'ai contractée à son
égard.*

*Je lui dédie ce travail comme
un témoignage bien faible de mon
fervent amour.*

A MON FRÈRE

A MES AMIS DE L'INTERNAT

A MON MAITRE ET PRÉSIDENT DE THÈSE

MONSIEUR LE PROFESSEUR CLUZET

PROFESSEUR DE PHYSIQUE BIOLOGIQUE, RADIOLOGIE
ET PHYSIOTHÉRAPIE

MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
CHEVALIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

Il n'a cessé de nous prodiguer, depuis le début de nos études médicales et depuis notre entrée dans son laboratoire, des preuves du plus bienveillant intérêt, nous guidant avec une sollicitude active et de tous les instants, et nous fournissant un appui moral précieux entre tous.

Ce travail est son œuvre autant que la nôtre ; il nous a fait un très grand honneur en nous confiant un sujet qui lui est particulièrement cher, et en acceptant la Présidence de notre Thèse.

A ce Maître, qui contribue sans cesse à notre formation scientifique, nous dédions ce travail comme un faible témoignage de notre profonde et infinie reconnaissance.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR J. LÉPINE

DOYEN DE LA FACULTÉ

MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

Nous avons pu apprécier à la Faculté et au cours d'un semestre d'Internat passé à la Clinique Neurologique de l'Hôtel-Dieu toute sa bienveillance à notre égard. Nous le prions de croire à notre très respectueux attachement.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR L. BÉRARD

PROFESSEUR DE CLINIQUE CHIRURGICALE

MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

DIRECTEUR DU CENTRE ANTICANCÉREUX DE LYON ET DU SUD EST

COMMANDEUR DE LA LÉGION D'HONNEUR

Nous le remercions bien vivement de s'intéresser à nous ; c'est un Maître que nous admirons profondément et qui nous permet, au Centre anticancéreux, d'étudier les possibilités thérapeutiques de la Radiothérapie et des Agents Physiques.

Nous le prions de bien vouloir agréer nos remerciements les plus vifs et de croire à notre profonde reconnaissance.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR PATEL

PROFESSEUR DE CHIRURGIE OPÉRATOIRE

CHIRURGIEN DE L'HOTEL-DIEU

MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

Nous l'avons connu presque dès le début de nos études médicales; nous n'oublierons jamais tout ce qui nous attache à lui. Le nom de ce Maître, si brillant et si bon, nous rappelle les meilleurs souvenirs de notre vie hospitalière.

C'est pour nous un guide très sûr et toujours dévoué qui nous a prodigué à maintes reprises les marques de sa grande bienveillance. Nous sommes particulièrement touchés de pouvoir le compter parmi nos Juges et sa présence est pour nous une marque de sympathie qui nous est spécialement chère.

A MES MAITRES
DU LABORATOIRE DE PHYSIQUE MÉDICALE

MONSIEUR LE DOCTEUR NOGIER

PROFESSEUR AGRÉGÉ
CHEVALIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

Il nous a fait l'honneur de nous confier la préparation de son cours de physique pharmaceutique, où nous avons pu apprécier la clarté de son enseignement. Nous lui exprimons notre plus vive gratitude pour tout ce qu'il nous a appris et pour la sympathie qu'il nous témoigne.

MONSIEUR LE DOCTEUR CHANOS

DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES
CHEF DES TRAVAUX

Nous collaborons sous sa direction aux travaux pratiques ; son esprit critique et sa forte érudition en font pour nous un Maître apprécié et aimé. Nous le remercions de l'intérêt qu'il nous a toujours porté et nous le prions de croire à notre attachement respectueux.

A MES MAITRES DE LA FACULTÉ DES SCIENCES

A MES MAITRES DE L'EXTÉRNAT
ET DE L'INTERNAT

A MES JUGES

INTRODUCTION

Depuis les mémorables travaux de Hertz confirmant si brillamment les idées géniales de Maxwell sur la nature électro-magnétique de la lumière ; depuis les travaux de Blondlot, Righi, Lebedew, Bose, Feddersen, on sait produire des *oscillations électriques* dont le nombre va de plusieurs milliards à quelques unités par seconde, en comprenant dans cette série les courants alternatifs des dynamos

Nous n'avons pas à rappeler ici la genèse et la succession des travaux remarquables de l'illustre Professeur d'Arsonval, en son laboratoire du Collège de France, de 1881 à 1897, travaux qui englobèrent le mode de production et les propriétés physiologiques de cette nouvelle modalité électrique que d'Arsonval proposa d'appeler les *courants de haute fréquence*.

La voie était largement ouverte par le génie de d'Arsonval et les connaissances acquises ultérieurement ne firent que confirmer l'œuvre de l'illustre physicien.

Plusieurs théories furent invoquées pour expliquer l'inexcitabilité des nerfs et des muscles par les courants

de haute fréquence, propriété essentielle de ces courants, signalée par d'Arsonval lui-même dès le début de ses recherches.

Il semble actuellement, en accord avec la théorie de Nernst sur la cause de l'excitabilité du nerf, que ce soit l'état alternatif des courants de haute fréquence qui les rende incapables de produire le phénomène d'excitation neuro-musculaire.

MM. Cluzet et Chevallier fournirent d'ailleurs en 1925, une confirmation brillante de cette théorie. Si un courant de haute fréquence est en effet rendu de sens constant par une modification appropriée, il acquiert alors la remarquable propriété de produire l'excitabilité neuro-musculaire. Il s'agit alors d'un courant de *haute fréquence redressé*, ainsi que proposèrent de l'appeler ces auteurs, par analogie avec la terminologie usitée par les courants alternatifs redressés de basse fréquence.

La polarité de cette nouvelle modalité électrique ne permet pas cependant d'identifier ses propriétés physiques avec celles d'un courant continu, car elles portent l'empreinte profonde de l'origine oscillatoire du courant.

*

Cette polarité est d'autre part la cause profonde du pouvoir excito-moteur des courants de haute fréquence redressés.

Le mécanisme par l'intermédiaire duquel l'électricité excite les nerfs et les muscles a été aperçu avec l'hypothèse de Nernst et complété par les travaux de Weiss,

Doumer, Reiss, Cluzet d'une part, et par ceux, plus récents de Lapicque, Cardot et Laugier, Adrian et Keith Lucas, Höfer, Lasareff d'autre part, pour ne citer que les principaux.

Les phénomènes de l'excitation et de l'influx nerveux, si mystérieux il y a quelques années encore, apparaissent, quant à leur cause essentielle, devoir être ramenés au phénomène purement physico-clinique de la polarisation des membranes.

C'est à la lumière des faits acquis par ces auteurs (polarisation des tissus — addition latente — état variable du courant) qu'il est possible d'expliquer l'action physiologique des courants de haute fréquence redressés.

Le pouvoir excito moteur de ces courants peut d'ailleurs apporter son aide à la clinique, mais dans le cadre de l'électro diagnostic classique.

On a opposé la physiologie et la pathologie, et fait remarquer que « trop souvent ces deux sciences poursuivent dans une funeste indépendance leurs chemins solitaires » (Laugier).

L'électrodiagnostic, depuis les travaux de Brenner, Baierlacher, Enlenburg et Erb, repose sur les bases physiologiques établies par Pflüger, Chauveau, Helmholtz. Le but poursuivi par les électrothérapeutes est d'obtenir, grâce à une constance expérimentale aussi exacte que possible, des résultats comparables et susceptibles de fournir des renseignements sur l'état fonctionnel des nerfs et des muscles.

Les physiologistes, au contraire, cherchant à connaître le déterminisme intime des phénomènes biologiques,

variant et perfectionnant leur instrumentation, parvinrent à connaître les facteurs essentiels de l'excitation neuro-musculaire. De l'ensemble des faits ainsi acquis, Lapique, Cardot et Laugier mirent en évidence l'importance exacte du facteur temps et du facteur intensité dans l'excitation d'un tissu donné.

De ces notions naquit alors une nouvelle méthode clinique d'examen électrique des nerfs et des muscles : celle de la mesure de la vitesse d'excitabilité des tissus, qui seule peut caractériser complètement l'excitabilité d'un tissu puisque seule, elle utilise des paramètres contenant une mesure de durée.

C'est dire que la nouvelle méthode d'examen électrique qui peut être déduite de la propriété excito-motrice des courants de haute fréquence redressés s'apparente avec les méthodes anciennes de l'électrodiagnostic codifiées par Erb, puisqu'elle n'utilise pas le facteur temps pour caractériser l'état fonctionnel des nerfs.

* * *

Cette thèse comprendra donc trois parties.

Une première partie où seront rappelés les modes de production des courants de haute fréquence, où seront mises en évidence la possibilité et la facilité de redresser les multiples courants englobés sous la dénomination générale de courants de haute fréquence. Cette partie comportera en outre une étude de ces courants par l'oscillographe cathodique de Dufour, l'examen de leurs propriétés physiques et leurs modes de mesure.

Une deuxième partie où seront examinées les propriétés physiologiques, surtout excito-motrices de ces courants, en elles mêmes et comparativement à celles des courants faradique, galvanique, et où seront étudiées l'influence de l'intensité, de la tension et de la fréquence de ces courants sur leur pouvoir excito-moteur.

Une troisième partie où seront exposées brièvement les possibilités d'application de cette propriété des courants de haute fréquence redressés à la clinique, tant au point de vue du diagnostic qu'au point de vue du traitement.

La possibilité d'utiliser pour ces deux buts un appareil de diathermie sera notamment à retenir, comme pouvant rendre pratiquement quelques services.

Première Partie

**ÉTUDE PHYSIQUE DES COURANTS
DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS**

CHAPITRE PREMIER

Production des courants de haute fréquence,

§ 1. GENERALITES

Les courants de haute fréquence sont des courants alternatifs comportant de très nombreuses oscillations (plus de 500.000) par seconde. C'est à d'Arsonval que l'on doit les travaux les plus importants sur ces courants ; son œuvre est double : physique et médicale. C'est lui qui a décrit le dispositif type pour l'obtention de tels courants ; c'est lui qui les a introduits en thérapeutique ; d'ailleurs, au Congrès international de physiothérapie (Berlin, 1913) le nom de « d'Arsonvalisation » fut donné aux modes thérapeutiques utilisant les courants de haute fréquence.

D'une manière générale, il y a production de ces courants lorsqu'un condensateur de capacité C se décharge dans un circuit doué d'une résistance ohmique R et

d'une self-induction L satisfaisant à la relation classique de Thomson

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Dans ce cas il y a production d'*oscillations électriques* dans le circuit de décharge, ou circuit oscillant. La décharge du condensateur est elle-même dite *décharge oscillante*.

La durée T de chacune des oscillations est alors telle que l'on ait

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$

$$\text{ou } T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (\text{Formule de Thomson})$$

si R est assez faible pour être négligée.

La fréquence des oscillations est

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

si R est négligeable. (L et C sont exprimés en unités électrostatiques C. G. S., L étant exprimé en seconde). On a ainsi la possibilité de faire varier la fréquence, en modifiant L et C mais nous verrons plus loin combien il est difficile d'apprécier la valeur de ces deux facteurs et par suite de *calculer* la valeur exacte de la fréquence.

Les formules que nous venons de rappeler semblent indiquer une unicité des courants de haute fréquence, qui en réalité n'existe pas.

Ces courants étant dus essentiellement à des décharges de condensateurs dans un circuit approprié sont formés de *trains d'ondes* séparés par des *intervalles de silence*, correspondant respectivement à la décharge et à la charge des condensateurs. Il s'en suit que plus les décharges des condensateurs seront rapprochées, plus les temps de silence seront réduits.

Il y aura donc différentes modalités de courants de haute fréquence suivant les durées respectives des temps oscillatoires et des temps de silence, et suivant la morphologie des ondes constitutives de ces courants.

Les courants obtenus avec des dispositifs primitifs (dispositif de d'Arsonval) ont des temps oscillatoires très courts par rapport aux temps de silence, et les ondes *s'amortissent* très rapidement.

Avec les courants fournis par des appareils diathermiques à éclateur, les temps de silence sont déjà plus courts mais restent nettement plus longs que la durée des trains d'ondes.

Progressivement, avec le perfectionnement des dispositifs producteurs de ces courants, on arriva à diminuer la durée des temps de silence. C'est ainsi que les postes diathermiques à lampe fournissent des trains d'ondes dont la durée est égale à celle des temps de silence. Les ondes deviennent alors d'amplitude plus égale, si bien qu'on leur donne le nom *d'ondes entretenues*. Enfin la T. S. F. fournit la possibilité d'émettre des courants de haute fréquence où il n'y a plus trace d'intervalle de silence et les trains d'ondes sont véritablement fusionnés en un ensemble homogène, formé d'ondes élémentaires équidistantes et d'amplitude rigoureusement égale.

Le polymorphisme des courants de haute-fréquence est donc évident et des plus marqué.

Outre ces différences qualitatives, interviennent des différences quantitatives de tension, d'intensité et de fréquence suivant les caractéristiques des circuits oscillants.

M. Chanoz signalait dès 1906 ce polymorphisme des courants de haute fréquence proprement dits. Il écrivait notamment : « Pour un même mode d'application (auto-conduction), les courants de haute-fréquence obtenus dépendent d'un grand nombre de facteurs : capacité des condensateurs, self-induction, résistance ohmique de la ligne, longueur de l'étincelle, fréquence des décharges. Par suite, pour un même mode d'application, des dispositifs différents donneront en général des courants physiquement différents. Des dispositifs identiques comme : capacité, self-induction, étincelle, pourront fournir des courants non identiques suivant la méthode employée pour la charge des condensateurs.

Dans l'utilisation de ces courants, les conditions physiques étant dissemblables, il pourra se produire, à priori, des différences dans les résultats physiologiques ou thérapeutiques. »

Ces dernières considérations s'appliquent également aux courants de haute fréquence redressés et nous verrons quelle importance prennent les caractéristiques de ces courants dans les actions physiologiques qu'ils produisent.

§ 2. LE DISPOSITIF DE D'ARSONVAL. ONDES AMORTIES

Le Professeur d'Arsonval n'arriva pas d'emblée au dispositif qui porte son nom. En 1881, alors qu'il commençait l'étude des effets physiologiques de l'état varia-

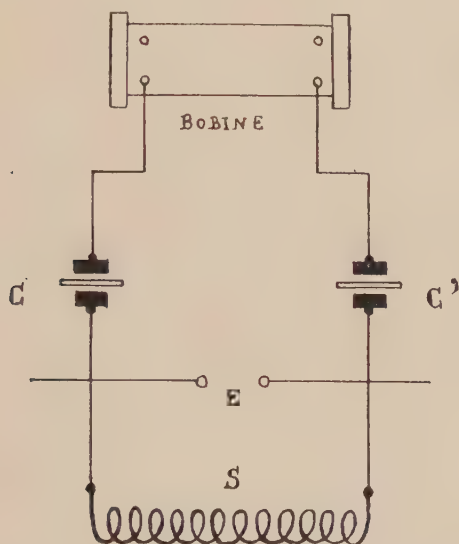


FIG. 1. — Schéma du dispositif de d'Arsonval.

ble du courant électrique, il utilisait des courants ayant 10.000 alternances par seconde, produits par un alternateur sans fer.

En décembre 1890, afin d'augmenter le nombre des oscillations du courant, d'Arsonval utilisa le vibreur de Hertz qui permet d'atteindre des fréquences allant

jusqu'à plusieurs millions par seconde, mais il constata rapidement que de tels courants avaient peu d'effets physiologiques en raison de leur faible intensité.

D'Arsonval songea alors à utiliser le dispositif que venait de signaler l'ingénieur Américain Tesla, en le modifiant toutefois pour protéger le sujet disposé en dérivation aux bornes du circuit oscillant, du courant du se-

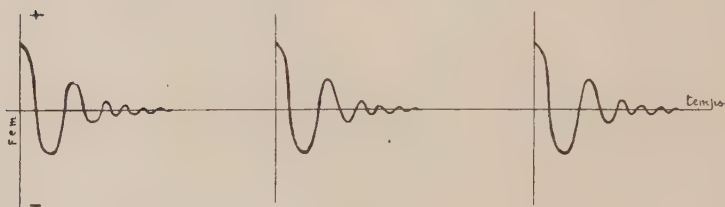


FIG. 2. — Représentation du courant de haute fréquence, à oscillations amorties (les temps de silence sont beaucoup plus longs que ne le représente le schéma).

condaire de la bobine. Ainsi se réalisa le dispositif type de d'Arsonval auquel il attacha son nom.

L'appareillage (fig. 1) comprend essentiellement deux condensateurs (d'Arsonval utilisait des bouteilles de Leyde) communiquant avec les pôles d'une forte bobine de Ruhmkorff par leurs armatures internes et avec un conducteur en spirale de gros fil métallique par leurs armatures externes. Le circuit comprend en outre deux pièces métalliques terminées par des pointes, des plateaux ou des sphères formant l'éclateur, pièce essentielle montée en dérivation sur le circuit et commandant les décharges des condensateurs. La bobine était alimentée généralement par du courant continu, découpé par un interrupteur.

Les courants fournis par cet appareil (fig. 2) sont constitués par un ensemble de *trains d'ondes*, correspondant

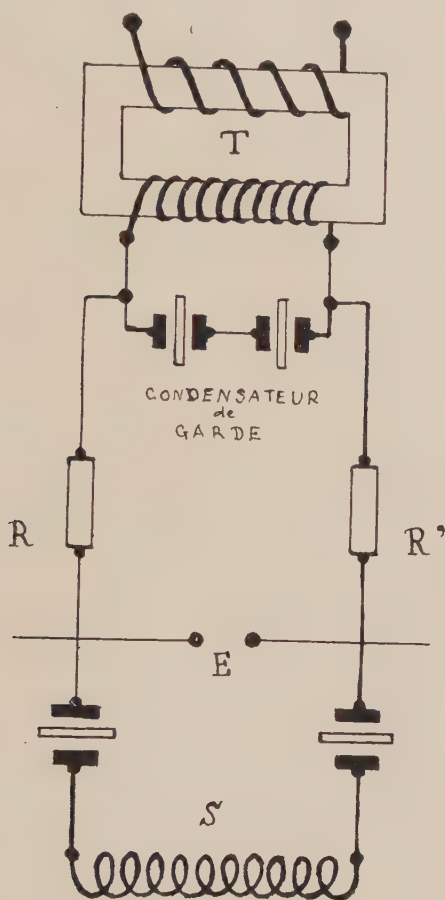


FIG. 3. — Schéma de l'appareil à grande puissance d'Arsonval Gaiffe.

chacun à une décharge des condensateurs et séparés par des *intervalles de silence*. Les ondes élémentaires constituant les trains d'ondes sont dites *amorties* car les oscil-

lations cessent très vite ; les intervalles de silence sont considérables par rapport aux périodes oscillantes si bien que Zimmern a pu dire qu'un tel appareil peut être comparé « à un pendule qui, battant la seconde dans l'eau, s'arrêterait après 10 ou 20 oscillations et ne serait mis en mouvement que toutes les quatre, huit ou douze heures par exemple ».

D'Arsonval, en 1892, para d'ailleurs à cet inconvénient, au moins en partie, diminuant la durée des périodes de silence, en soufflant les étincelles produites par l'éclateur, en entourant celui-ci d'un électro-aimant. Il obtint ainsi des ondes peu amorties.

L'illustre professeur du Collège de France modifia encore quelque peu son dispositif primitif, en utilisant un transformateur à circuit magnétique fermé, fonctionnant sur courant alternatif. La réalisation actuelle en est l'appareil producteur de haute fréquence d'Arsonval-Gaiffe (fig. 3), où les résistances liquides et les condensateurs de garde empêchent la formation d'un arc à l'éclateur et s'opposent au retour des ondes dans le transformateur.

Nous verrons que ces courants de haute fréquence à ondes amorties sont susceptibles d'être redressés mais nous mettons en évidence dès maintenant la prépondérance considérable des temps de silence sur les périodes oscillatoires.

§ 3. Les APPAREILS DIATHERMIQUES à ECLATEURS ONDES PEU AMORTIES

C'est l'existence d'ondes amorties et de zones de silence considérables dans les courants produits par le dispositif de d'Arsonval, qui conduisit les physiciens et les constructeurs à modifier l'éclateur. Plus les étincelles produites par cette pièce seront courtes, nettes et nombreuses, plus les décharges des condensateurs seront répétées ; les périodes oscillatoires seront accrues et les périodes de silence diminuées d'autant, si bien qu'un tel courant sera constitué par des *ondes peu amorties*. Signalons d'ailleurs que la terminologie se modifie alors. Ces courants permirent de réaliser l'*application directe* des courants de haute fréquence, dotés d'une forte intensité. Nagelschmidt (de Berlin) donna en 1910 à cette modalité d'application le nom de thermopénétration qui se transforma en 1913 en Diathermie (congrès de physiothérapie), en raison de la chaleur pénétrante qu'ils dégagent au sein des tissus.

Les appareils diathermiques à éclateur sont de divers types, mais leur circuit réalise toujours le même dispositif, celui de d'Arsonval ; seul l'éclateur présente des modifications suivant les appareils. Le principe de cette pièce essentielle reste le même : augmenter le nombre des étincelles disruptives en rapprochant les pièces polaires, en augmentant leur surface, ce qui donne non plus une étincelle unique à chaque fermeture ou rupture du cou-

rant primaire, mais une pluie serrée d'étincelles. On purifie encore celles-ci en les produisant parfois au sein d'un diélectrique gazeux qui les rend plus franches et diminue l'échauffement des pièces de l'éclateur.

Nous rappellerons très rapidement les types d'éclateurs :

a. LES ÉCLATEURS FIXES se composent de petites pièces métalliques entre lesquelles jaillissent les étincelles.

L'éclateur de Broca est constitué par deux masses de cuivre rouge, rapprochées généralement à 1 millimètre environ l'une de l'autre, et placées dans une atmosphère de gaz d'éclairage ou de vapeur d'éther pour éviter un échauffement excessif des pièces, grâce à la décomposition endothermique des hydrocarbures en carbone et hydrogène.

L'éclateur Telefunken, éclateur à plateaux, se compose de disques de cuivre maintenus à un écartement fixe, réglable, par des rondelles périphériques de mica.

L'éclateur à pastilles de tungstène a ses électrodes fixées dans une pièce cylindrique par serrage d'un écrou ; des ailettes latérales permettent de régler l'écartement des électrodes et de favoriser le refroidissement des pièces.

L'éclateur de Walter présente l'avantage de réduire au minimum l'échauffement de l'éclateur ; les étincelles se produisent entre deux plaques de nickel, dans une petite chambre étanche fermée de toute part au moyen d'une rondelle isolante de caoutchouc.

b. LES ÉCLATEURS TOURNANTS sont dus à d'Arsonval qui fit construire les premiers modèles dans son laboratoire

du Collège de France. L'une des électrodes est constituée par un disque mobile autour de son centre et portant des pointes sur sa circonférence. Lors de la rotation du disque les pointes se présentent contre la deuxième électrode fixe. Les étincelles éclatent alors, leur nombre étant fonction du nombre des pointes et de la vitesse de rotation du disque.

Tous ces éclateurs donnent un nombre considérable d'étincelles en un temps court ; les décharges des condensateurs suivent la même fréquence et le courant fourni par ces appareils est constitué par des trains d'ondes à haute fréquence, les oscillations étant peu amorties.

§ 4. APPAREILS DIATHERMIQUES à LAMPE TRIODE ONDES « ENTRETENUES »

Les courants diathermiques produits par les appareils à éclateur présentent encore des périodes de silence très longues par rapport à la durée des trains d'ondes. Si ce fait n'a que peu d'importance en diathermie, il en a une considérable, ainsi que nous le verrons plus loin, pour l'étude des courants diathermiques redressés.

Il existe deux moyens de produire des courants de haute fréquence à ondes « entretenues » (ondes non amorties) : *l'arc chantant de Duddet* (1900) modifié par Poulsen (1903), et les *lampes à trois électrodes* (lampes triodes).

Nous ne parlerons pas de l'arc de Poulsen (utilisé dans

l'appareil diathermique Simon) car nous n'en avons pas redressé les courants.

Nous avons fait une grande partie de nos recherches avec un poste diathermique à une lampe à trois électrodes; nous rappellerons rapidement le principe de fonctionnement de ces lampes comme producteurs d'oscillations électriques et nous donnerons un type d'appareil diathermique à lampe : l'appareil triodiathermique de Bordier.

1. Rappel du fonctionnement des lampes triodes comme génératrices d'oscillations entretenues.

Nous passerons rapidement sur la longue série des recherches qui conduisit à la constitution des lampes triodes. Edison, Fleming, Lee de Forest sont les trois noms qui dominent l'histoire de ces lampes. Progressivement les connaissances s'accrurent et l'on sait actuellement qu'un relais amplificateur de courant peut être le siège d'oscillations électriques.

Edison mit en évidence (1890) le phénomène de l'émission électronique par les conducteurs métalliques portés à l'incandescence, et dans une expérience portant sur une lampe comprenant un filament de carbone et une plaque métallique, montra que l'espace plaque-filament possédait une conductibilité unilatérale laissant passer le courant électrique seulement lorsque le potentiel de la plaque était supérieur à celui du filament.

Fleming étudia (1890) ce cas particulier d'ionisation et une telle lampe devint une *valve* de *Fleming* ou *valve à deux électrodes* ou *kénotron*.

Lee de Forest ajouta (1907) une troisième électrode aux valves de Fleming mais ce n'est que plus tard que le rôle de cette nouvelle électrode ou *grille* fut mis en évidence.

Nous n'insisterons pas sur le rôle capital de cette pièce : nous rappellerons simplement que la grille est un clapet sensible pour les électrons ; elle peut « par de faibles variations de tension, provoquer des variations de courant qui n'auraient pu être obtenues sans elle que par des changements considérables dans le potentiel de la plaque ». (Bordier)

Pour comprendre la production et l'entretien d'oscillations dans un tel circuit, représentons-nous (fig. 4) un circuit plaque d'une lampe triode. Le circuit oscillant self-capacité produira des oscillations égales entre elles s'il est possible de compenser les pertes d'énergie du système (par effet Joule). C'est la lampe qui joue ce rôle. D'une façon analogue un pendule d'horloge présente des oscillations d'amplitude égale grâce à un mouvement d'échappement capable de libérer une énergie égale à celle qui est dissipée par les frottements.

Supposons que dans le circuit oscillant nous portions la plaque à un potentiel supérieur à celui du filament par une batterie P ; le filament est porté à l'incandescence par une pile P' dont le potentiel est inférieur à celui de P.

Si une perturbation initiale, due à l'allumage de la lampe, par exemple provoque des oscillations de faible amplitude du circuit oscillant, les variations d'intensité

du courant induit dans la bobine grille L' une force électromotrice variable de même fréquence. Il en résulte par suite des variations périodiques du potentiel de grille et des modifications d'intensité du courant dans le circuit

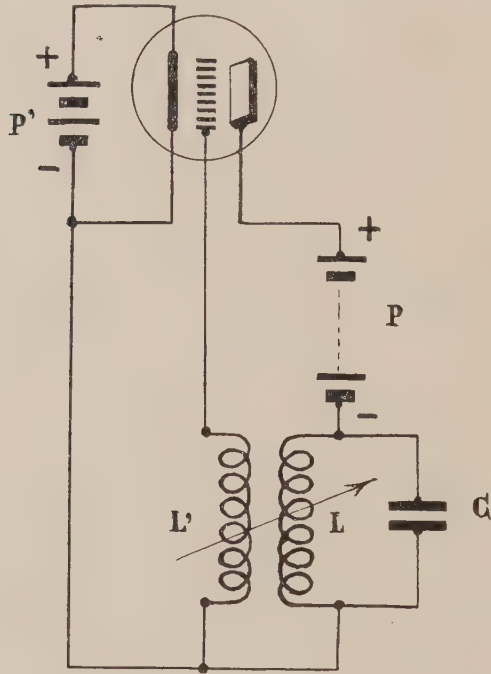


FIG. 4. — Circuit oscillant intercalé sur le circuit plaque d'une lampe triode. Production de la tension alternative de la grille par induction de L sur L' .

plaque. Le passage de ce courant dans le circuit oscillant y engendre une force électromotrice qui compense pour une phase convenable, la chute ohmique de tension et entretient les oscillations. La puissance perdue par effet Joule est restituée par la pile P grâce aux tensions alternatives appliquées à la grille.

On sait que l'intensité i du courant filament-plaque, la tension V de la plaque et la tension v de la grille sont reliées par la relation

$$i = \frac{1}{P} (V + k_v)$$

où P est la résistance intérieure de la lampe (10.000 ou 20.000 ohms environ) et k une constante appelée *facteur d'amplification*, sur laquelle nous ne pouvons insister,

L'entretien des oscillations ne peut se réaliser que lorsque les valeurs de la capacité du condensateur C , de la résistance R et de la self induction L de la bobine plaque, et la valeur du coefficient d'induction mutuelle M des deux bobines L L' satisfont à certaines relations où entrent les valeurs de la résistance intérieure et du facteur d'amplification k de la lampe.

On démontre que les oscillations seront entretenues lorsque le coefficient d'induction mutuelle satisfera aux relations

$$M < \frac{C_p}{k} \left(R + \frac{L}{C_p} \right)$$

(valeur correspondant au plus petit couplage entre les bobines).

et

$$M > \frac{C_p}{k} \left[R + \frac{L}{C_p} + 2\sqrt{\frac{L}{C} \left(1 + \frac{R}{P} \right)} \right]$$

(valeur correspondant au plus grand couplage entre les bobines).

en ne tenant compte que des valeurs absolues car M ne peut être que négatif. Le développement de ces formules

figure notamment dans le livre de M. Gutton : La lampe à trois électrodes, auquel nous les avons empruntées. Alors que le couplage est à son minimum, le coefficient M , réalisant la *condition limite d'entretien* (condition éolienne de Blondel) la pulsation ω du courant oscillant produit est

$$\omega = \frac{\sqrt{1 + \frac{R}{\rho}}}{\sqrt{LC}}$$

R est toujours beaucoup plus petit que ρ si bien que la pulsation est très voisine de sa valeur $\frac{1}{\sqrt{LC}}$, et que la période est sensiblement

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

c'est-à-dire qu'elle est donnée par la formule de Thomson pour les courants de haute fréquence.

Les oscillations seront entretenues lorsque l'amplitude des variations de tension de la grille est suffisante pour que le point de fonctionnement atteigne les régions courbées des caractéristiques (fig. 5).

Dans les régions courbées des caractéristiques, les variations d'intensité du courant plaque, correspondant à des variations données de la tension grille, deviennent plus faibles et l'amplitude des oscillations se stabilise à la valeur pour laquelle la lampe compense exactement l'énergie perdue par effet Joule. Le coefficient d'induction mutuelle M , reflet du couplage des bobines plaque et grille conditionne le caractère des oscillations : près de

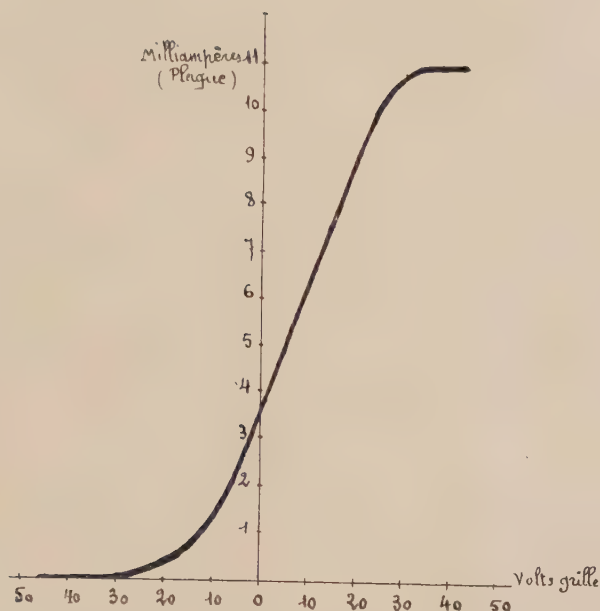


FIG. 5. — Courbe *caractéristique* de plaque à tension de plaque constante (Gutton).

la limite d'entretien, l'amplitude des oscillations est maxima mais leur stabilité est minima ; si on couple plus fort, l'amplitude diminue mais la stabilité croît.

2. L'appareil triodiathermique de Bordier.

Nous ne parlerons ni du poste de Bordier fonctionnant sur continu, ni de son premier poste fonctionnant sur alternatif (110 volts 50 périodes), pour ne parler que de son véritable appareil triodiathermique.

Son schéma figure en particulier dans le livre de son auteur (4^e édition, p. 95); nous rappellerons simplement qu'il fonctionne sur courant alternatif (110 v., 50 périodes) nécessitant par suite un survolteur pour fournir la tension plaque et un dévolteur pour assurer le chauffage des filaments. Par suite du mode d'alimentation du poste et du montage de l'appareil, la lampe ne doit fonctionner a priori que pendant une alternance sur deux (fait que nous avons vérifié à l'oxillographe cathodique de Dufour), si bien que les périodes de silence ont la même durée que les périodes d'oscillations.

3. L'appareil de Chenaille qui a servi à nos essais.

Nous avons utilisé au cours de nombreuses expériences et pour l'oscillographie de ces courants, un poste diathermique comportant une lampe de 300 watts.

Son dispositif (fig. 6) est un peu différent du schéma classique. Il est facile de voir, en effet, que le circuit oscillant self-capacité (self réglable, condensateur à capacité fixe) est intercalé non sur le circuit plaque mais sur le circuit grille. La tension plaque est fournie par le transformateur auquel la plaque est reliée directement, séparée cependant de ce dernier par une self de choc. Il existe dans le circuit de grille un condensateur accessoire fixe et une résistance (sans self théoriquement) destinés à jouer un rôle de *frein* sur la grille. Un deuxième condensateur, dit *d'accord* est placé entre le circuit grille et le circuit plaque (on le voit à la partie inférieure du sché-

ma), il est destiné à compenser la capacité de la plaque et à équilibrer, par suite, les circuits de grille et de plaque. Ce poste est alimenté par un courant alternatif (110 volts 50 périodes) qui assure également le chauffage du filament.

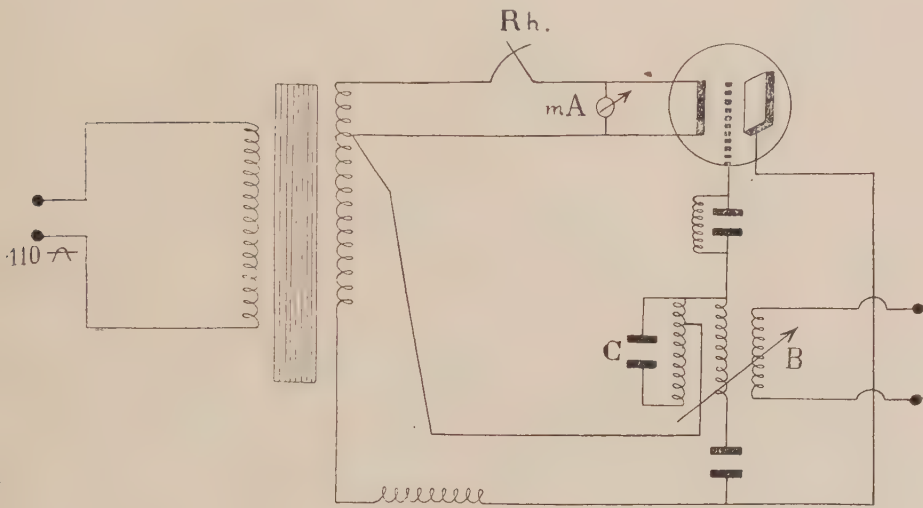


FIG. 6. — Schéma de notre poste diathermique Chenaille, à lampe.

Les courants diathermiques fournis par ces postes, couramment utilisés en médecine, sont formés d'ondes dites entretenues ; les trains d'ondes ont des durées égales aux périodes de silence, soit $1/100$ de seconde si le courant d'alimentation a 50 périodes par seconde.

Ces courants présentent donc des ondes élémentaires qui ne sont pas d'amplitude égale, malgré leur nom d'on-

des entretenues. De plus les pointes des ondes sont situées sur deux sinusôides théoriques, mais cette *enveloppante* bien qu'irrédelle est prise en considération dans la pratique et reçoit parfois le nom de *composante continue*.

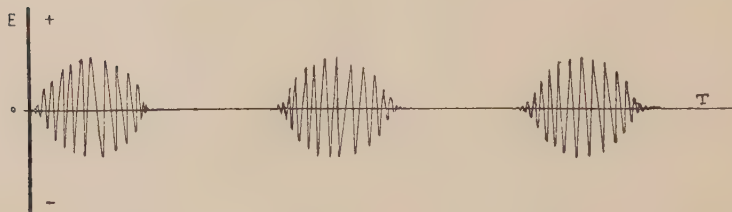


FIG. 7. — Forme des ondes fournies par les postes diathermiques à une lampe.

du courant de haute fréquence, reconnaissant pour cause l'alimentation du poste par un courant *alternatif brut*, non redressé. Nous verrons comment nous fûmes conduits à l'éliminer au cours des essais physiologiques cités plus loin.

4. Poste diathermique à deux lampes montées en opposition.

Il est possible de combler les intervalles de silence séparant les trains d'ondes fournis par un poste alimenté par un courant alternatif. Certains constructeurs ont étudié et construit de tels postes (les établissements Chenaille par exemple). Nous n'avons pas eu entre les mains un tel appareil ni même les plans ; mais il est facile de s'en.

imaginer le dispositif. Nous reproduisons (fig. 8) un schéma de poste à deux lampes fonctionnant sur alternatif brut, que nous avons imaginé avec le D^r Cribier, secrétaire technique du Radio Club de Lyon.

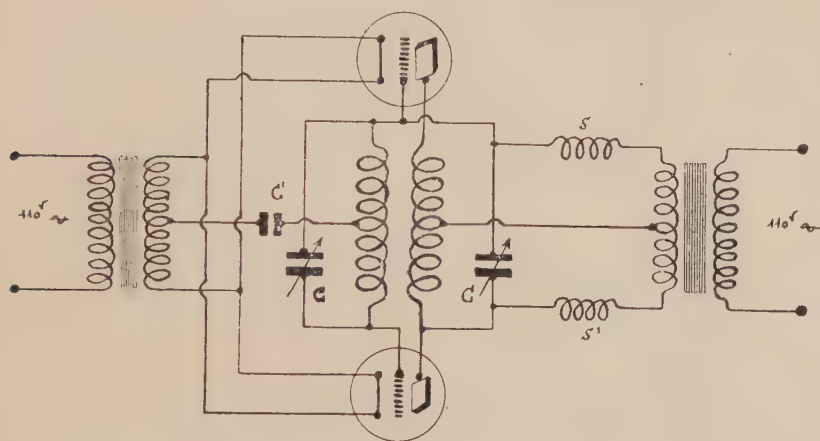


FIG. 8. — Schéma d'un poste diathermique à 2 lampes triodes montées en opposition.

Le principe en est très simple et rationnel : il suffit de disposer les lampes en opposition, en réunissant par le condensateur *c* la plaque d'une lampe avec la grille de l'autre lampe et vice-versa. La bobine du circuit oscillant (ou mieux les 2 bobines n'en formant qu'une) peut avoir une self variable, le condensateur *c* étant fixe ; ou bien on peut réaliser le dispositif inverse : self fixe, capacité variable comme dans notre schéma.

Dans ces conditions, chaque lampe travaille sur chaque alternance, et les trains d'ondes fournis se succèdent

régulièrement juxtaposés, n'étant plus séparés par des temps de silence.

En réalité les périodes silencieuses ne sont pas entièrement supprimées ; entre deux trains d'ondes elles persistent en S en raison de l'alimentation du poste par courant alternatif brut.

Tous les courants diathermiques fournis par des postes à lampe sont donc formés de trains d'ondes réguliers

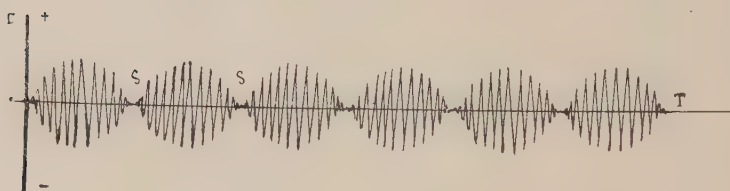


FIG. 9. — Aspect schématique des courants fournis par un appareil diathermique à deux lampes montées en opposition.

constitués eux-mêmes par des ondes dites « *entretenues* », bien qu'inégales entre elles, les périodes oscillatoires étant séparées par des périodes de silence plus ou moins longues. Si de telles particularités ne sont pas gênantes dans la pratique médicale, dans les applications de diathermie ou d'électro-coagulation par exemple, il n'en est plus de même pour une étude physiologique précise des courants diathermiques redressés. Il est par exemple impossible d'exciter, dans les mêmes conditions, un nerf ou un muscle par de tels courants en raison des amplitudes inégales des ondes et de l'existence des zones silencieuses. Il est impossible par suite avec une clef de Morse, par

exemple, de découper en des temps égaux des quantités d'électricité égales ; les conditions d'expérimentation auront varié d'une expérience à l'autre et il sera impossible de dégager des conclusions des faits observés.

Il y a bien un moyen pour prélever dans un tel courant un seul ou plusieurs trains d'ondes : il faudrait utiliser un rupteur synchrone à contacts glissants, analogue à celui mis en service sur l'oscillographe cathodique de Dufour ; mais il faudrait que le rupteur soit beaucoup plus démultiplié que celui de Dufour qui donne le $1/10^{\circ}$ de seconde en général. Il faudrait le construire de telle sorte qu'étant toujours en synchronisme avec les périodes du courant alternatif alimentant le poste diathermique à lampe, il n'assure le passage du courant dans le muscle expérimenté que pendant $1/100^{\circ}$ de seconde (si l'alternatif d'alimentation est à 50 périodes). La construction d'un tel rupteur synchrone est loin d'être irréalisable mais elle nécessite, de même que son maniement un appareillage trop compliqué pour le but à atteindre.

Il existe un moyen plus simple, plus sûr d'obtenir des ondes d'amplitude égale, il suffit d'alimenter la lampe triode par un courant continu, issu de l'alternatif brut du secteur, mais nous entrons alors dans le domaine de la T. S. F.

§ 5. LES APPAREILS EMETTEURS DE T. S. F. ONDES RIGOREUSEMENT ENTRETENUES

C'est pour éliminer les périodes silencieuses, l'inégalité d'amplitude des ondes, et la composante continue des trains d'ondes présentées par les courants diathermiques des postes à lampe, que M. le P^r Cluzet nous conseilla d'effectuer les recherches concernant les propriétés physiologiques des courants diathermiques, avec un poste émetteur de T. S. F.

Un premier essai fut pratiqué à la Station Officielle de Lyon-la-Doua (4 kilowatts, 466 mètres de longueur d'onde), avec M. le P^r Cluzet que nous assistions dans cet essai. Nous approchions du circuit oscillant du poste générateur un circuit capteur (simple spirale de 10 tours) relié à un redresseur. Nous eûmes alors de belles contractions musculaires, ce qui nous prouva que c'étaient bien les ondes de haute fréquence (et non leur enveloppante : composante continue) qui étaient douées de cette propriété.

Pendant la modulation du courant, les contractions étaient beaucoup plus fortes, en raison des pointes élevées présentées par les ondes de haute fréquence.

Ces expériences, que nous signalons ici pour ce motif, nous incitèrent à poursuivre nos recherches avec un

poste émetteur. Nous eûmes l'heureuse fortune d'avoir un tel appareil (1) à notre disposition au laboratoire de Physique médicale où nous pûmes poursuivre l'étude des effets physiologiques des courants de haute fréquence redressés.

1. Constitution du poste qui a servi à nos essais.

Il s'agit d'un poste émetteur de T. S. F. de 120 watts, émettant des ondes dont la fréquence peut varier de 7 millions à 600.000 environ par seconde (la longueur d'onde variant de 40 à 500 mètres environ).

Le schéma de l'appareil montre qu'il s'agit d'un montage du type Hartley.

Le poste est alimenté par le courant alternatif du secteur de ville (110 volts, 50 périodes). Le courant est survolté par un transformateur Ferrix à prise médiane (1000-1000 volts) avant d'être redressé par quatre kénotrons utilisant les deux alternances (la figure ne comporte que 2 kénotrons afin de n'être pas surchargée). Le chauffage des filaments des kénotrons est assuré par le courant alternatif du secteur dévolté entre 2 et 6 volts par un transformateur à prise médiane.

Le système oscillateur comprend deux lampes triodes

(1) Nous remercions MM. Gally et Cribier, président et secrétaire technique du Radio-Club de Lyon qui nous ont très obligeamment prêté ce poste.

soignée, son isolement irréprochable, de façon à pouvoir supporter sans inconvénient la haute tension qui peut lui être appliquée.

Un tel système nécessite en outre, pour fonctionner normalement, différentes autres pièces. Outre le circuit de chauffage des filaments des lampes oscillatrices (le potentiel de chauffage variant entre 2 et 6 volts) il faut une self et trois condensateurs fixes.

La self de choc S. ch. est destinée à empêcher le reflux de la haute fréquence dans le circuit des kénotrons. Elle est intercalée entre eux et la plaque des oscillateurs ; elle a un coefficient de self qui varie selon la tension du courant haute fréquence, elle est forte pour les hautes tensions et inversement. Le condensateur fixe C_1 est destiné à établir un barrage entre les branches du circuit haute tension, barrage que l'on oppose au courant de haute fréquence. Sa capacité était de 4 microfarads pour notre poste travaillant au maximum à 1200 volts de tension haute fréquence.

Le condensateur fixe C_2 situé dans le circuit grille est shunté par une résistance sans self. Il est calculé de façon à pouvoir compenser la capacité propre de la plaque équilibrant ainsi les deux circuits de grille et de plaque. Sa capacité était sur notre poste de 3 à 5 millimicrofarads. La résistance placée en dérivation sur ses bornes est une résistance sans self pouvant atteindre une valeur de 10.000 ohms, (en courant continu) mais devant de toute façon laisser passer un courant grille de 30 à 40 milliam-pères au maximum. L'ensemble forme donc un véritable *système-frein* destiné à agir sur la grille.

Le condensateur C_3 est disposé en série sur le circuit de plaque entre la source de haute tension et la bobine plaque ; c'est un condensateur d'*arrêt* qui nécessite une faible capacité (2 millimicrofarads sur notre poste) mais qui exige obligatoirement un isolement rigoureux prévu pour 15.000 volts environ.

2. Conditions de l'oscillation de la lampe triode.

Le poste émetteur oscillera lorsque le coefficient d'induction mutuelle des bobines L et L' aura une valeur satisfaisant aux relations citées plus haut à propos des appareils diathermiques à une lampe. Pour que le poste commence à osciller, pour qu'il *s'accroche*, il faut chercher par tâtonnements (d'ailleurs très courts, surtout s'il s'agit d'ondes longues) une valeur satisfaisante de ce coefficient d'induction mutuelle M . On y arrive facilement par la prise mobile M que l'on déplace soit du côté grille soit du côté plaque. En général le point M est soit médian soit vers l'extrémité plaque de la bobine totale (environ vers le $1/3$ de l'enroulement du côté plaque).

Lors de la modification du coefficient M il faut tenir compte de la menace du *désaccrochage* des lampes oscillatrices ; (l'intensité du courant grille diminue alors instantanément, les plaques peuvent rougir et les lampes se percer). C'est la valeur du coefficient M qui conditionne la stabilité des oscillations. C'est seulement lorsque le poste *s'accroche* (le coefficient M est à ce moment la *condition éolienne* de M. Blondel) que la période des oscilla-

tions répond à la formule de Sir W. Thomson, et l'on sait que plus l'on s'éloigne des conditions de l'accrochage, plus la période T des oscillations devient grande et ne cesse de grandir jusqu'au moment du désaccrochage. Il y a donc intérêt, pour ne pas trop s'écarter de cette formule fondamentale, à opérer près des conditions d'apparition des oscillations.

3. Modes de réglage du poste.

Le réglage d'un poste émetteur de T. S. F. porte sur la tension et sur la fréquence des courants de haute fréquence fournis.

a. *Pour agir sur la tension* du courant haute fréquence on peut modifier la tension du courant alternatif alimentant les redresseurs en agissant (par l'intermédiaire du rhéostat R_1) sur le potentiel de chauffage de leurs filaments. On peut encore agir dans le même sens en modifiant (par le rhéostat R_2) le potentiel de chauffage des filaments des lampes triodes oscillatrices, mais ce deuxième moyen est moins puissant que le premier, auquel personnellement nous avons eu presque uniquement recours. L'appareil que nous utilisons permettait de faire varier la tension plaque des kénotrons de 100 à 1200 volts.

b. *Pour agir sur la fréquence* des ondes produites, deux moyens peuvent être employés. On peut ou bien agir la capacité du circuit oscillant ou bien agir sur sa

self-induction. On peut par la modification de la capacité C du condensateur variable, obtenir une modification de la fréquence, mais dans des proportions plus faibles qu'avec le deuxième procédé. Le maniement du condensateur doit être considéré comme un moyen précis, destiné à compléter le deuxième. C'est ainsi par exemple, qu'avec des bobines L et L' données, le condensateur seul peut fournir une gamme de longueurs d'ondes comprises entre 200 et 500 mètres ou 50 et 100 mètres par exemple. On peut, en modifiant les bobines L et L' obtenir au contraire des variations bien plus considérables. C'est ainsi que nous avons eu recours, au cours de nos expériences à un jeu de trois bobines L-L' nous permettant d'obtenir trois gammes de longueur d'ondes.

{	Longueurs d'ondes de 50 à 100 mètres
	— — — 100 à 200 mètres
	— — — 200 à 500 mètres

Les caractéristiques de nos bobines L-L' étaient les suivantes (nous donnons les caractéristiques de l'ensemble des 2 bobines, car leurs valeurs respectives étaient variables suivant la position de la prise M, essentiellement mobile).

Long. d'ondes (en mètres)	Longueur des bobines (en centim.)	Diam. des bobines (en centim.)	Nombre de tours de spire	Coefficient de self induction (en Henrys)
50-100	9,5	7,7	20	$2 \cdot 10^{-5}$
100-200	9,0	8,0	30	$6 \cdot 10^{-5}$
200-500	12,0	8,5	56	$18 \cdot 10^{-5}$

La valeur des coefficients de self-induction est calculée à partir de la formule classique

$$L = \frac{\pi^2 N^2 d^2}{l}$$

où N représente le nombre de tours de spire,

d — le diamètre de la bobine,

l — la longueur de la bobine,

L — le coefficient de self induction exprimée en centimètres (1 cm = 10⁹ Henrys).

La formule est supposée exacte pour une bobine très longue et néglige l'action perturbatrice des pôles du solénoïde. Les valeurs que nous avons fournies ne sont donc qu'approchées, elles donnent néanmoins une valeur approchée des coefficients de self-induction.

4. Caractéristiques des ondes obtenues.

Ici il n'existe plus de période de silence, le courant obtenu ne formant qu'un seul et unique train d'ondes. L'amplitude des ondes est égale (à 1/100 près si le courant redressé alimentant les kénotrons est filtré). Le schéma est représenté figure 11.

*
* * *

Ces différents modes d'obtention des courants de haute-fréquence sont classiques et facilement réalisables. Nous

avons signalé les installations du type médical (dispositif type de d'Arsonval, appareils de diathermie à éclateur ou à lampe) et les postes émetteurs de T. S. F. (actuellement inutilisés en médecine). Ces appareils fournissent tous des courants de haute fréquence mais qui sont très différents les uns des autres, leurs ondes se perfectionnant, si l'on peut dire, progressivement depuis les ondes très amorties du dispositif type d'Arsonval, jusqu'aux ondes rigoureusement entretenues des postes émetteurs de T. S. F.

Le maniement des appareils à haute fréquence du type médical est très facile ; celui des postes émetteurs est un peu plus délicat en raison de la susceptibilité des lampes oscillatrices.

Les quelques complications techniques présentées par les postes émetteurs de T. S. F. sont néanmoins vite surmontées, surtout lorsqu'on opère avec des ondes de 200 à 500 mètres. D'autre part, si l'on considère la nécessité absolue d'opérer, pour des mesures précises avec des ondes rigoureusement entretenues et formant un seul train d'ondes, et si l'on considère que seuls les postes de T. S. F. fournissent cette possibilité, on se rend compte que ces difficultés expérimentales sont bien peu de chose auprès des avantages fournis par de tels appareils.

L'égalité presque absolue de l'amplitude des ondes (à 1/100 près si le courant est filtré, ce qui supprime du même coup les harmoniques), l'absence de périodes de silence, l'absence d'une *composante continue* de basse fréquence s'ajoutant aux ondes de haute fréquence (com-

posante continue qui se trouve sur les postes diathermiques à lampe, alimentés par de l'alternatif brut, non redressé) ont pour résultat de permettre l'étude exacte des propriétés des courants de haute fréquence redressés.

Si pour ne citer qu'un exemple, on considère l'étude du pouvoir moteur des courants de H. F. R. (haute fréquence redressée), on peut, à l'aide d'une clef de Morse, découper dans un tel courant des quantités d'électricité égales en des temps égaux (toutes choses égales d'ailleurs), et c'est là une condition optima d'étude de ces courants que n'offre aucun autre appareil générateur de haute fréquence.

§ 6. MODE DE CAPTATION DES COURANTS DE HAUTE FREQUENCE

Il faut capter les courants de haute fréquence au niveau du solénoïde, siège des oscillations électriques, afin de les diriger sur un redresseur de courant, constitué ainsi que nous le verrons plus loin par un système de deux ou quatre valves thermo-ioniques.

Dans un appareil type d'Arsonval, il faut se brancher par deux contacts sur le petit solénoïde.

Dans un appareil diathermique, il faut se brancher aux bornes d'utilisation. Il n'y a aucune difficulté dans les deux cas.

S'il s'agit d'un appareil émetteur de T. S. F., le problème est plus délicat et la difficulté varie suivant la fréquence du courant à capter.

Les ondes dont la longueur est de l'ordre de 200 à 500 mètres sont recueillies par une bobine entourant le circuit oscillant générateur ; le couplage des deux bobines est en général aisé. Dans nos essais nous avons notamment capté les courants de fréquence inférieure à 1.000.000 avec une bobine comportant 155 tours de fil de cuivre et 12 cms de diamètre. Une prise était mobile, ce qui permettait d'opérer avec une bobine de longueur variable et d'obtenir par des phénomènes de résonance des tensions fortes pouvant atteindre plusieurs milliers de volts.

Les ondes dont la longueur est plus courte, de l'ordre de 50 à 100 mètres sont beaucoup plus difficiles à capter. Nous les avons recueillies avec un circuit composé de 3 tours seulement d'un fil de maillechort, de 8 centimètres de longueur et 12 cms de diamètre. Tout le circuit ne servait pas à la captation, car il présentait comme précédemment une prise fixe et une prise mobile. La résonance du circuit oscillant et du circuit capteur survenait lorsque la longueur du circuit capteur était d'environ un tour de spire. Il fallait opérer par tâtonnements successifs, une faible variation des conditions d'oscillations (causées par les bobines ou le condensateur) suffisait parfois à décrocher le poste. C'est là une difficulté assez sérieuse pour l'emploi des ondes courtes et qui doit en restreindre le champ d'expérimentation physiologique.

Quel que soit d'ailleurs le mode d'obtention et de captation des courants de haute fréquence, il suffit de les diriger sur un système redresseur convenablement monté pour obtenir leur redressement, ainsi que nous allons le voir.

CHAPITRE II

Redressement des courants de haute fréquence.

§ 1. GENERALITES. DEFINITION

La définition du redressement du courant alternatif peut s'appliquer aux courants de haute fréquence, et l'on

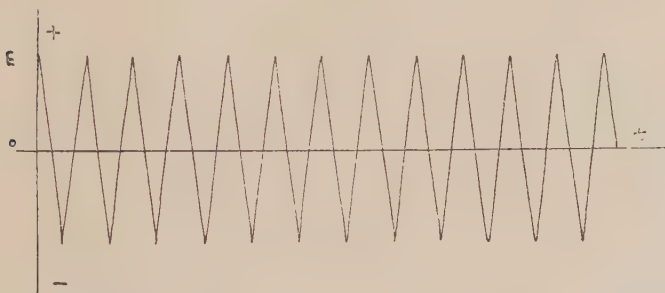


FIG. 11. — Schéma des ondes entretenues de haute fréquence émises par un poste de T. S. F.

peut dire : « Redresser un courant de haute fréquence, c'est transformer ce courant en un courant tel que sa valeur moyenne pendant une période soit différente de zéro.

Si l'on considère un courant de haute fréquence représenté par la figure 11, on voit que les alternances changent de sens une fois sur deux ; la valeur moyenne d'une

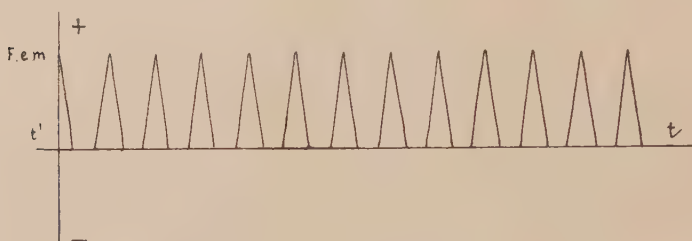


FIG. 12. — Courant de H. F. redressé avec utilisation d'une seule alternance.

période est égale à zéro. Si nous voulons obtenir un courant dont la valeur moyenne soit différente de zéro, nous pouvons soit supprimer toutes les alternances de même signe, (fig. 12 où les alternances supprimées sont celles

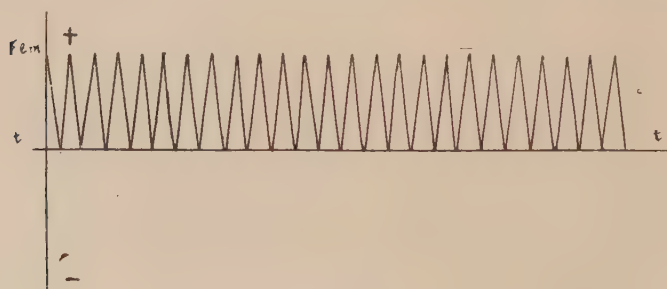


FIG. 13. — Courant de H. F. redressé avec utilisation des deux alternances.

situées au-dessous de l'axe ot), soit reporter ces alternances de l'autre côté de l'axe ot (fig. 13).

Dans le premier cas, il s'agit d'un courant de haute fréquence redressé avec utilisation d'une seule alternan-

ce ; le courant est polarisé mais non véritablement redressé. Dans le deuxième cas, il s'agit d'un courant de haute fréquence redressé avec utilisation des deux alternances, le courant est alors non seulement polarisé, mais encore véritablement redressé.

De toute façon, on peut appliquer à ces deux modalités de courant, l'expression de courant de haute fréquence redressé ; il suffit pour les distinguer, d'indiquer si le courant utilise une ou deux alternances.

Dans les deux cas d'ailleurs, les deux courants sont semblables et possèdent les mêmes propriétés physiques.

§ 2. TENSION, INTENSITÉ ET FRÉQUENCE EN HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉE

Supposons que nous ayons un courant de haute fréquence de tension maximum E_0 et de tension moyenne E_m . Si nous faisons abstraction de la chute de tension dans le redresseur, (il suffit d'ailleurs pour rendre le raisonnement admissible de mesurer E_m à la sortie d'une résistance ohmique égale à celle du redresseur), nous pouvons raisonner avec ces valeurs E_0 et E_m concernant le courant redressé.

On a entre E_0 et E_m les relations :

$$E_m = \frac{2 E_0}{\pi}$$

La tension moyenne du courant redressé E_{rm} est différente suivant que le courant comporte l'utilisation d'une ou de deux alternances.

1. *Le courant de H. F. R. utilise une alternance.*

Dans ce cas nous avons :

$$E_{rm} = \frac{E_m}{2} \quad \text{d'où}$$

$$E_{rm} = \frac{E_o}{\pi}$$

De même pour l'intensité du courant redressé, le même raisonnement fournit la relation :

$$I_{rm} = \frac{I_o}{\pi}$$

2. *Le courant de H. F. R. utilise deux alternances.*

Dans ce cas, la force électromotrice moyenne du courant redressé est égale à celle du courant non redressé ; il en est de même d'ailleurs pour l'intensité moyenne et l'on a alors les deux relations :

$$E_{rm} = E_m = \frac{2}{\pi} E_o$$

$$I_{rm} = I_m = \frac{2}{\pi} I_o$$

La fréquence d'un courant de H. F. R. sera également fonction du mode d'obtention de celui-ci.

S'il y a utilisation d'une alternance, la fréquence du courant redressé sera la même que celle du courant dont il provient.

S'il y a utilisation des deux alternances, la fréquence

du courant redressé sera le double de celle du courant dont il dérive.

Ces trois grandeurs : tension, intensité et fréquence caractérisent *quantitativement* un courant de haute fréquence redressé ; nous verrons ultérieurement les moyens que l'on peut employer pour les mesurer.

§ 3. LES DISPOSITIFS REDRESSEURS DES COURANTS DE HAUTE-FRÉQUENCE

Pour obtenir un courant de haute fréquence redressé il faut utiliser un redresseur qui ne laisse passer aucun *courant inverse* (redressement incomplet), qui puisse fonctionner sous des voltages variables, parfois très élevés, et dont la rapidité de fonctionnement puisse s'adapter à la fréquence du courant considéré.

Par suite, les redresseurs utilisés en courant alternatif de basse fréquence ne sont pas tous aptes à servir en haute fréquence.

Les redresseurs peuvent être classés en deux grandes catégories suivant qu'ils utilisent ou non le phénomène d'Edison-Richardson (émission électronique des corps conducteurs incandescents).

Quoiqu'il en soit, le principe des redresseurs reste toujours le même, c'est celui de la *conductibilité unilatérale*, un courant électrique ne pouvant les traverser que dans un sens déterminé.

Nous ne parlons pas évidemment des redresseurs mé-

caniques qui devant fonctionner à la fréquence du courant, ne peuvent être utilisés en haute fréquence.

1. Redresseurs n'utilisant pas l'effet Edison.

a) *Soupape électrolytique.*

Pollak montra (1897) que si l'on plonge dans une solution de phosphate d'ammonium (100 grammes par litre d'eau distillée) une électrode de plomb et une électrode d'aluminium, le courant ne peut passer que dans le sens Pb-Al.

Cette cuve électrolytique n'est pas un redresseur parfait, car elle laisse passer, en courant alternatif, un *courant inverse* important. Il en est de même en haute fréquence si bien qu'il s'agit d'un procédé pratiquement inutilisable.

b) *Lampes à vapeur de mercure.*

La lampe de Cooper-Hewitt est construite de telle sorte que si l'on essaye de faire jaillir une étincelle entre une électrode de mercure et une électrode de carbone contenues dans son enceinte où règne le vide, on constate que le courant ne peut passer que dans le sens carbone-mercure.

Ces lampes constituent de bons redresseurs pour des tensions allant jusqu'à 12.000 volts, mais ne fonctionnent que pour des courants de 50 à 600 périodes, de sorte qu'on ne peut les employer en haute fréquence.

c) *Lampes sans filament.*

Il s'agit des soupapes pointe-plateau (à conductibilité unilatérale pointe-plateau), ou des soupapes Villard (ou

de tout type analogue), ou encore des nouvelles lampes Raytheou-Smith (1926) constituées par deux plaques et deux tiges dans une atmosphère de néon. Ces lampes constituent d'assez bons redresseurs, mais peuvent laisser passer un courant inverse parfois important, et certaines d'entre elles (lampes Raytheou-Smith) ne fonctionnent que sous un voltage maximum de 400 volts.

2. Redresseurs utilisant l'effet Edison.

a) Redresseurs secs au cuivre - oxyde de cuivre.

Les Américains Geiger et Grondhal signalèrent (1926) que, si l'on oxyde sur l'une de ses faces et sur une épaisseur de l'ordre du quart de dixième de millimètre, un disque de cuivre, la résistance électrique présentée est faible dans le sens oxyde-cuivre, très élevée dans le sens cuivre-oxyde. Le rapport des résistances atteint suivant les appareils les valeurs 1000 et même 10.000. C'est dire qu'il s'agit là d'un redresseur excellent dont le principe repose sur l'émission électronique du cuivre à *la température ordinaire*, ce qui explique le sens de conductibilité unilatérale oxyde-cuivre.

Le rendement de ce redresseur est de 55 à 60 %. Cependant, cet appareil présente un défaut grave, c'est qu'un disque (cuivre-oxyde) ne peut supporter au maximum qu'une différence de potentiel de 5 volts. Par suite si l'on veut redresser un courant de plus haut voltage, il faut augmenter proportionnellement le nombre des disques si bien que pour des courants de haute fréquence, à tension élevée, il faudrait un nombre considérable de disques élémentaires pour opérer leur redressement.

Ce redresseur devient par suite inutilisable en haute fréquence, d'autant qu'il est possible d'opérer un redressement parfait avec deux redresseurs simples, de maniement facile, représentés par les valves à deux ou trois électrodes.

b) *Valves à deux électrodes - kénotrons.*

Les caractéristiques et le mode de fonctionnement des kénotrons sont classiques et nous ne les rappellerons pas.

Nous signalerons simplement que l'emploi des kénotrons est délicat pour le redressement en haute fréquence, en ce sens qu'ils ne constituent pas des appareils passe-partout s'appliquant uniformément à des courants de tension trop différente.

On sait en effet qu'un kénotron a des limites de fonctionnement réglées par la tension qui doit lui être appliquée. Cette élasticité de fonctionnement est due aux caractéristiques, donc au mode de construction de la valve.

Il en résulte qu'un kénotron, en bon état et convenablement monté dans un circuit où circule un courant de haute fréquence à redresser, peut très bien ne pas remplir son rôle si la tension du courant ne s'accorde pas avec les caractéristiques de la valve.

Nous avons vérifié ce fait un peu surprenant, avec l'oscillographe cathodique de Dufour, et nous avons vu, après le redressement théoriquement effectué par le kénotron, persister un courant inverse qui représentait 30 à 40 % d'une alternance.

Cependant si le kénotron est prévu pour une tension donnée, il y a là un excellent mode de redressement.

Le rendement des kénotrons est bon, cependant il faut signaler que la chute de tension qu'il provoque peut atteindre une valeur importante : 25 % sous 2.500 volts par exemple.

C'est en raison de l'adaptation parfois fort incomplète des kénotrons (en haute fréquence) à leur rôle, que nous avons préféré utiliser des valves à trois électrodes.

c) *Valves à trois électrodes.*

Les lampes à trois électrodes peuvent servir de *valves thermo-ioniques* par branchement des grilles aux plaques (nous n'avons pas toujours représenté, plus loin, les grilles sur les schémas des montages redresseurs en raison de ce fait). Les valves à trois électrodes ont sur les kénotrons le gros avantage d'avoir des limites de fonctionnement beaucoup plus étendues, bien que la grille soit réunie à la plaque, ce qui nous ramène au schéma d'une valve à deux électrodes.

La conductibilité unilatérale dans le sens plaque filament est, pour une même valve, aussi parfaite pour des tensions basses que pour des tensions élevées, ainsi que nous l'ont prouvé toutes nos expériences et nos enregistrements, s'appliquant à des courants de tensions très différentes, étagées entre 20 volts et plusieurs milliers de volts.

Le rendement des lampes triodes fonctionnant comme valves thermo-ioniques est, comme pour les kénotrons, de 75 % environ ; il est toujours suffisant pour les applications physiologiques ou médicales des courants de haute fréquence redressés.

La simplicité de leur maniement, leur absence presque

totale d'entretien, leur rendement satisfaisant, leur longue durée (1.000 heures au moins) font donc des lampes à trois électrodes fonctionnant comme valves thermo-ioniques, des instruments de choix pour le redressement des courants de haute fréquence.

Nous verrons dans les *montages redresseurs*, qu'une variété de lampe, les lampes bi-plaque constitue également un bon procédé de redressement.

Il faut donc, en définitive, retenir comme bons procédés de redressement en haute fréquence, les kénotrons (s'ils sont adaptés à la tension appliquée) et les valves à trois électrodes. Suivant la variété du montage redresseur, le courant redressé utilisera une seule alternance ou les deux.

§ 4. MONTAGES REDRESSEURS

Nous avons vu qu'il était possible d'utiliser les courants redressés à une ou deux alternances, des montages simples permettent d'obtenir ces deux modalités de courant : polarisé ou véritablement redressé. Les procédés pratiques de redressement en haute fréquence sont les mêmes que ceux du redressement en basse fréquence.

1. Redressement avec utilisation d'une seule alternance.

Redresseur de Cluzet et Chevallier.

On peut obtenir un courant schématisé par la figure 12 (page 56) en disposant une lampe triode à l'extrémité du

circuit capteur de haute fréquence, mais dans ce cas le rendement est faible.

C'est pour accroître la puissance disponible que MM. Cluzet et Chevallier firent construire par la Maison Gaiffe

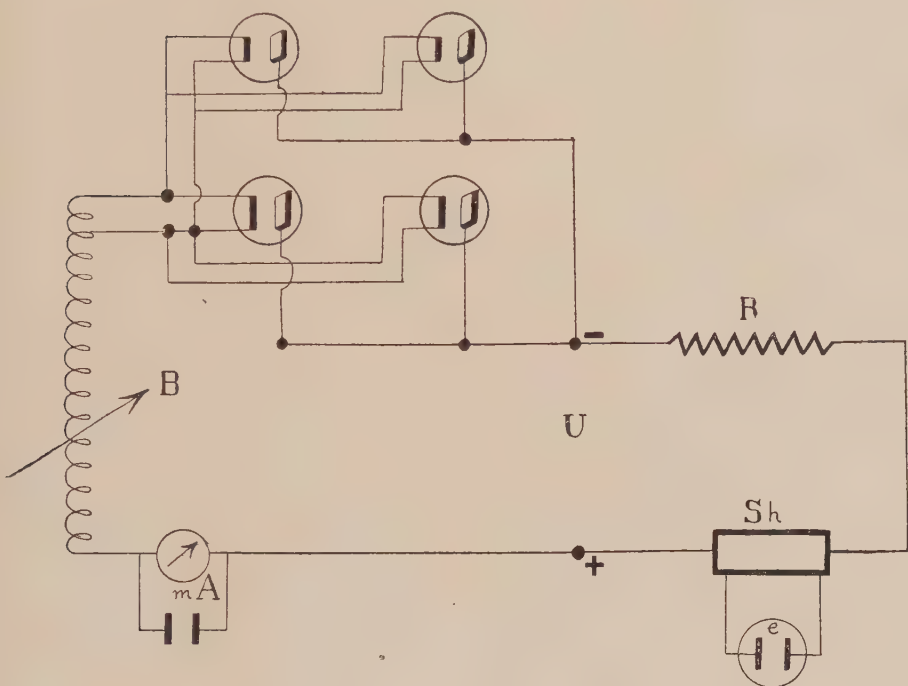


FIG. 14. — Montage et redressement avec utilisation d'une alternance (figurent en outre le circuit d'utilisation et d'enregistrement oscillographique).

un redresseur qu'ils appellent également un « *tétaniseur* » (pour rappeler ses possibilités d'action physiologique), comportant 4 valves thermo-ioniques. Ils constatèrent que les effets physiologiques du courant redressé à une alternance étaient sensiblement les mêmes

que ceux du courant redressé utilisant les deux alternances et conservèrent sur leur poste un dispositif permettant d'obtenir la première modalité du courant redressé.

Nous représentons fig. 14 le schéma de ce redresseur, qui a servi à tous nos essais.

On voit que les quatre lampes triodes sont montées de façon mixte en série et parallèle, les grilles étant exclues du circuit, si bien que ces lampes fonctionnent uniquement comme redresseurs de courant, tout comme des valves thermo-ioniques banales.

Les lampes sont toutes branchées sur une même extrémité du circuit capteur, n'utilisant par suite de ce montage qu'une alternance.

La tension plaque est fournie directement par la haute tension ; l'incandescence des filaments est assurée par le courant alternatif du secteur de ville (110 volts 50 périodes) convenablement dévolté, (entre 4 et 8 volts).

La réalisation pratique de ce montage a été assurée par la Maison Gaiffe-Gallet-Pilon, sous la forme d'un appareil simple et de maniement facile : 2 bornes marquées H. F. correspondent à l'arrivée du courant de haute fréquence et 2 bornes marquées Utilisation représentent les origines du circuit d'utilisation du courant redressé. Le chauffage des filaments est réglé par deux rhéostats auxquels correspondent 2 voltmètres gradués de 4 à 8 volts. L'intensité du courant est indiquée par un milliampèremètre électromagnétique shunté, mesurant 5 ou 50 milliampères ; 2 clefs de Morse, inversant la polarité des électrodes, se trouvent enfin sur cet appareil.

2. Redressement avec utilisation des deux alternances.

Montage en pont.

Il est facile d'obtenir un redressement véritable du courant par un montage classique *en pont*, représenté figure 15.

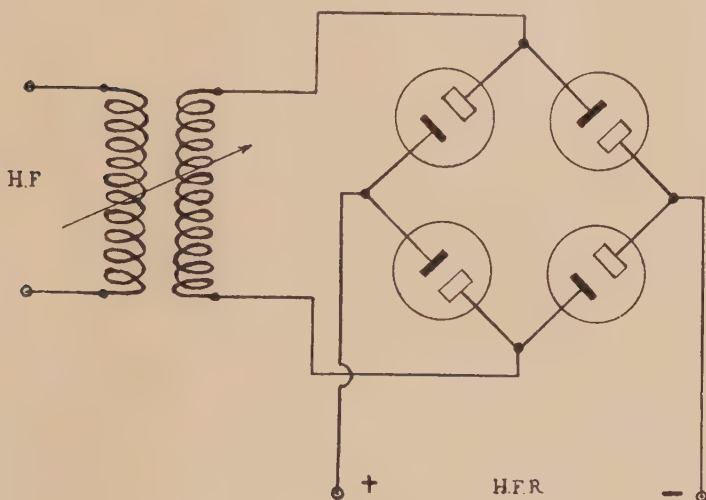


FIG. 15. — Montage en pont :
redressement avec utilisation des deux alternances.

L'inconvénient de ce montage est la nécessité absolue d'avoir quatre valves thermo-ioniques. Le montage précédent est d'ailleurs facilement transformable en celui-ci.

Nous rappellerons que MM. Cluzet et Chevallier n'ont pas remarqué d'action physiologique plus intense avec

les courants fournis par ce montage, nous ne l'avons personnellement pas utilisé.

3. Redressement avec utilisation des deux alternances par une valve bi-plaque.

On peut obvier à la nécessité d'employer 4 valves tout en utilisant les deux alternances, en redressant le courant avec une valve bi-plaque.

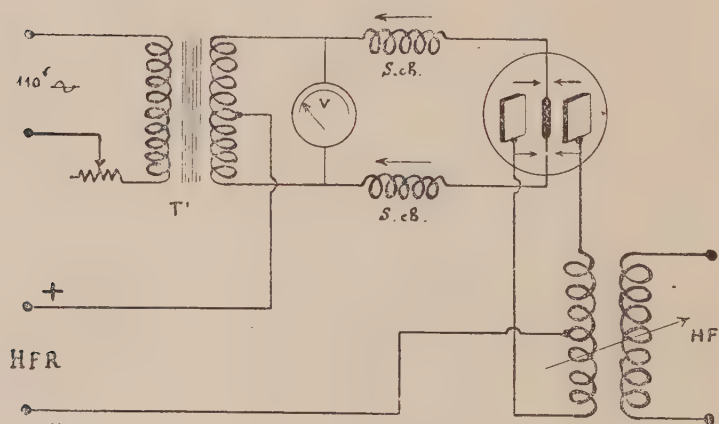


FIG. 16. — Redressement par une valve bi-plaque
avec utilisation des deux alternances.

Il suffit, ainsi que le montre le schéma du montage, de brancher chaque plaque sur une extrémité différente du circuit capteur de haute fréquence. Chaque alternance passe dans la valve suivant le sens plaque filament. Le

courant est véritablement redressé par une seule valve. C'est là un avantage sensible.

Somme toute, trois montages sont à retenir pour le redressement des courants de haute fréquence, tous trois emploient d'ailleurs les valves thermo-ioniques. Qu'il s'agisse de redressement par des valves disposées en série, en pont, ou par une valve bi-plaque, le courant est rigoureusement redressé quelle que soit la valeur de sa tension ; les effets physiologiques des courants redressés sont identiques, quel que soit le montage adopté, utilisant les deux alternances ou une seule.

CHAPITRE III

Etude oscillographique des courants de haute fréquence redressés.

§ 1. L'OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE DE DUFOUR

L'enregistrement des phénomènes électriques ayant une fréquence considérable ne peut pas se faire avec des appareils enregistreurs dont la période d'inertie est de beaucoup supérieure à la période du phénomène considéré. C'est le cas par exemple, de l'enregistrement des courants de haute fréquence ; pour les enregistrer il faut avoir recours à un procédé d'inscription dénué de toute inertie pratique. Deux appareils permettent un tel enregistrement : *le tube de Braun* et *l'oscillographe cathodique de Dufour*.

Ces deux procédés d'inscription reposent sur la propriété qu'ont les rayons cathodiques d'être déviés par les champs électrostatique ou magnétique.

Le tube de Braun est le plus ancien des deux. Nous ne l'avons pas utilisé et n'en parlerons pas longuement.

Nous signalerons simplement que son usage fut limité par trois inconvénients : la tache cathodique n'est reçue que sur un écran fluorescent placé hors du tube à vide et ne permet pas l'enregistrement véritable et définitif du phénomène étudié ; le faisceau cathodique est reçu d'abord sur un miroir puis sur l'écran fluorescent de sorte que l'intensité lumineuse de la tache cathodique est toujours faible ; enfin l'étude du phénomène étudié reposant sur la simple observation visuelle, il arrive que pour les hautes fréquences, en raison de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, on n'ait souvent qu'une représentation erronée du phénomène. Il suffit de comparer d'ailleurs l'allure du phénomène offert par la vue et celle qui est imposée par la pellicule photographique (dans l'oscillographe cathodique) pour se rendre compte que les impressions visuelles sont parfois complètement fausses, en tout cas toujours insuffisantes, surtout pour l'étude des hautes fréquences.

1. Rappel du principe de l'oscillographe cathodique de Dufour

C'est cette série d'inconvénients présentés par le tube de Braun qui conduisit M. Dufour à édifier son oscillographe. Le principe reste le même que celui du tube de Braun, la réalisation pratique seule diffère.

M. Dufour utilisa également la propriété des rayons cathodiques d'être déviés par les champs électrique ou magnétique, la trace du pinceau cathodique étant enregistrée sur un papier sensible entourant un cylindre tournant ou sur des plaques photographiques fixes.

a) DÉVIATION DU FAISCEAU CATHODIQUE PAR UN CHAMP
ÉLECTROSTATIQUE

Soit un faisceau cathodique très mince, délimité par un diaphragme et se propageant dans le tube cathodique suivant une direction ox . Plaçons dans le tube un condensateur plan produisant un champ électrique uniforme H , de direction perpendiculaire à ox (fig. 17).

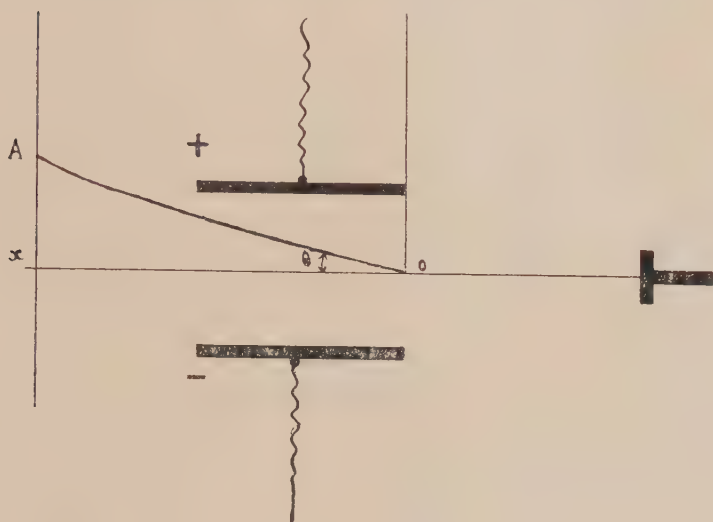


FIG. 17. — Déviation du faisceau cathodique par un champ électrostatique dû à un courant de sens constant.

Le faisceau cathodique, formé d'électrons chargés négativement, est, dès son arrivée entre les plateaux du condensateur, attiré par le plateau positif, repoussé par le plateau négatif; la trajectoire du rayon cesse par suite d'être rectiligne et affecte une forme parabolique telle que OA . Suivant la droite x A se trouve disposé soit un écran fluorescent, soit une plaque photographique.

Si le condensateur est relié à une source de courant de haute fréquence, les armatures du condensateur changent de signe autant de fois que les alternances du courant ; par suite, le déplacement de la tache cathodique sur l'écran fluorescent se fait de part et d'autre de la ligne 0 x, axe des potentiels nuls.

La valeur de la déviation angulaire θ , supposée petite, causée au faisceau cathodique par un champ électrostatique uniforme H est :

$$\theta = H \frac{e}{m} \frac{L}{v^2}$$

où H est l'intensité du champ, e/m le rapport charge/masse des électrons constituant le faisceau, v leur vitesse et L la longueur pendant laquelle ils sont soumis à l'action du champ H.

S'il s'agit d'un courant de haute fréquence redressé, la polarité des plateaux du condensateur est fixe, le condensateur se charge, le courant ne passe pas et la déviation du faisceau cathodique se fera, en obéissant à la formule précédente, toujours vers l'armature positive du condensateur, d'un seul côté de l'axe des potentiels nuls.

b) DÉVIATION DU FAISCEAU CATHODIQUE PAR UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Soit encore un faisceau cathodique étroit, délimité par un diaphragme et passant dans le champ électrique produit par deux solénoïdes parcourus par le courant à étudier.

Le faisceau cathodique subit la même déviation qu'un courant rectiligne d'intensité i . Le sens de la déviation répond à la deuxième loi de Laplace. On sait que la force soumise à l'élément de courant considéré est dirigée vers la gauche d'un observateur placé le long du conducteur,

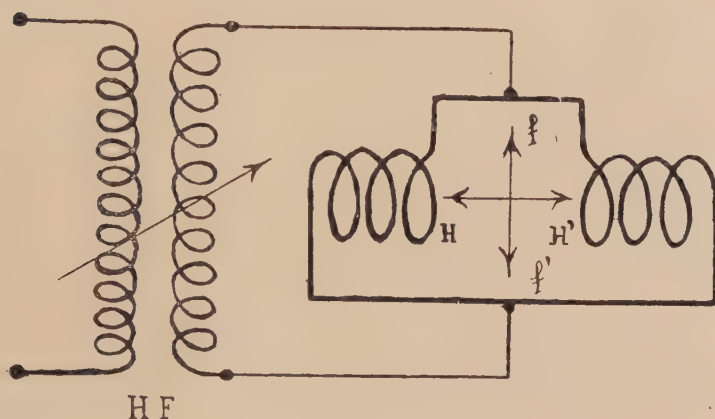


FIG. 18. — Déviation suivant f et f' du faisceau cathodique par un champ magnétique $H H'$ produit par un courant de haute fréquence.

(le courant lui entrant par les pieds et lui sortant par la tête), et qui regarde dans la direction du vecteur H représentant le champ magnétique.

On peut se représenter sur un schéma, en vue supérieure, la projection sur un plan horizontal de la déviation subie par le faisceau cathodique lors de la traversée du champ magnétique H . Cette déviation (fig. 18) a lieu dans le sens des flèches f et f' . La tache cathodique dont le trajet rectiligne passe par le point o , se déplace tour à tour suivant f et f' s'il s'agit d'un courant de haute fré-

quence, sous l'action combinée des pôles opposés des deux solénoïdes.

La valeur de la déviation angulaire imposée au faisceau cathodique est

$$\theta = H \frac{e}{m} \frac{L}{v}$$

les symboles ayant les mêmes significations que précédemment.

S'il s'agit d'un courant de haute fréquence redressé seul persiste le déplacement suivant f ou f' .

Dans les deux cas, qu'il s'agisse d'un champ électrostatique ou magnétique, la déviation du faisceau cathodique est proportionnelle à la valeur H du champ puisque les autres éléments de la formule donnant la valeur de la déviation angulaire sont constants.

On possède ainsi, par la connaissance de la déviation angulaire du faisceau cathodique (comme par l'amplitude du déplacement sur le papier sensible et la longueur du pinceau cathodique soumis à l'action du champ), un moyen précis de déterminer H . Or, ce champ H est créé par l'intermédiaire du phénomène à enregistrer de sorte que celui-ci peut facilement être étudié.

La déviation du faisceau cathodique par un champ électrostatique fournit une courbe de tension du courant étudié, tandis que la déviation par un champ électrique donne la courbe du courant lui-même.

Ces considérations s'appliquent à l'étude de tous les courants, elles sont particulièrement précieuses en haute fréquence et pour le but que nous avons poursuivi.

2. Modes d'enregistrement avec l'oscillographe cathodique.

La déviation produite par les champs doit se faire perpendiculairement à l'axe des potentiels ou intensités nulles ; il faut de plus pouvoir rapporter le phénomène étudié à un deuxième axe, celui des temps, si bien que le phénomène sera ainsi inscrit par rapport aux axes cartésiens habituels : les longueurs portées en abscisse seront proportionnelles aux temps, celles portées en ordonnées étant proportionnelles à la grandeur électrique étudiée : tension ou courant.

C'est pour réaliser l'enregistrement en fonction du temps que M. Dufour « étala » la déviation de la tache cathodique (encore appelée « *spot* »), tout comme en physiologie, on étale la courbe tracée par un stylet inscripteur en assurant un mouvement de rotation au cylindre de Marey.

Il faut donc produire, dans l'oscillographie des courants de haute-fréquence, un deuxième déplacement du faisceau cathodique, dans un sens perpendiculaire à la première déviation, produite par les champs.

La production de cet étalement conditionne des dispositifs techniques divers suivant la fréquence du phénomène étudié ; on réalise ce deuxième déplacement par deux procédés différents : rotation simple du cylindre enregistreur ou emploi de « *champs auxiliaires* » ; ces deux modes d'obtention du deuxième déplacement du pinceau cathodique conditionnent eux-mêmes trois modes d'enregistrement : en basse, moyenne et haute fréquence. Nous les signalerons rapidement, ayant utilisé les deux premiers.

a) ENREGISTREMENT EN BASSE FRÉQUENCE

Ce mode d'enregistrement convient pour oscillographier des courants électriques dont la fréquence ne dépasse pas quelques milliers de périodes par seconde. Le courant étudié aboutit aux deux armatures du « *condensateur déviateur* » ou traverse un solénoïde suivant que l'on veut obtenir une courbe de tension ou de courant.

La rotation du cylindre enregistreur suffit à assurer l'étalement de la tache cathodique, préalablement déviée par le champ. Pour que cet étalement soit perpendiculaire au sens de la déviation initiale, il faut que cette dernière soit parallèle à l'axe de rotation du cylindre. Une rotation du cylindre de 10 tours à la seconde est suffisante pour obtenir un tracé parfaitement lisible se rapportant aux axes de coordonnées habituelles.

b) ENREGISTREMENT EN MOYENNE FRÉQUENCE

Ce mode d'inscription convient à des courants dont la fréquence ne dépasse pas un nombre de périodes de quelques centaines de mille par seconde.

L'étalement de la tache cathodique que produirait la seule rotation du cylindre serait insuffisante. On utilise alors l'action supplémentaire d'un « *champ auxiliaire* » dû à un courant oscillant accessoire qui allonge les déviations du faisceau cathodique. La combinaison des déviations produites par le champ auxiliaire et la rotation du cylindre donne un étalement notable de la tache cathodique.

Dans ce mode d'enregistrement, le courant oscillant accessoire, ou « *courant de balayage* », dont la fréquen-

ce est beaucoup moins grande que celle du courant étudié, doit s'inscrire, par des déviations de grande amplitude, parallèlement à l'axe de rotation du cylindre, tandis que les variations de faible amplitude dues aux oscillations du courant de haute fréquence s'inscrivent sur les précédentes, perpendiculairement à elles.

Le courant auxiliaire est produit soit par un alternateur à vitesse réglable fournissant de 100 à 800 périodes par seconde, soit par un arc chantant fournissant de 2.000 à 20.000 périodes par seconde.

c) ENREGISTREMENT EN HAUTE FRÉQUENCE

C'est le procédé de choix pour des courants dont la fréquence est comprise entre quelques centaines de mille à plusieurs millions de périodes par seconde. Nous n'avons pas utilisé ce mode d'enregistrement au cours de nos essais ; nous ne le rappellerons donc succinctement, que pour mémoire. L'étalement de la tache cathodique produit par la rotation du cylindre devient tout à fait négligeable, de sorte qu'on remplace celui-ci par un système fixe de six plaques photographiques, système d'« *interstructures à plaques* ». L'étalement du spot est réalisé, non plus par un seul courant oscillant accessoire, mais par deux actions de balayage d'amplitude inégale : une première action donne des oscillations par variations d'un champ magnétique ; une deuxième est produite par les variations d'un champ magnétique ou électrique.

Les oscillations de ces deux champs sont provoquées par le courant oscillant d'un arc à oscillations entretenues dirigé sur les armatures d'un condensateur ou à travers un solénoïde.

Le tracé terminal obtenu par ce procédé est donc le résultat de trois sortes d'oscillations. Les premières, de grande amplitude, sont formées par les variations du champ magnétique ; les deuxièmes, de plus faible amplitude sont dues aux variations d'un champ électrostatique ou magnétique. Ces deux actions se combinent pour former des tracés ayant la forme de V juxtaposés. C'est sur cet ensemble, que s'inscrivent les petites oscillations du courant de haute fréquence à oscillographier.

Au cours de l'enregistrement oscillographique des courants, il ne faut allumer le tube cathodique que pendant un tour de rotation du cylindre (ou pendant un temps très court dans le troisième mode d'enregistrement), afin de ne pas superposer les tracés. Il faut de plus que les actions auxiliaires et le phénomène étudié se déclenchent exactement au même moment. M. Dufour fut conduit alors à mettre au point un « *rupteur synchrone à contacts glissants* », sur lequel nous passerons.

3. Conditions de nos enregistrements.

Nous avons eu l'heureuse possibilité d'effectuer des enregistrements avec l'oscillographe cathodique de Dufour, mis obligeamment à notre disposition par la Compagnie Générale d'Entreprises Electriques de Delle, à son usine de Lyon-Villeurbanne (1). Le courant à étu-

(1) Nous remercions M. A. Clerc, ingénieur en chef du laboratoire d'essais qui a bien voulu nous initier au fonctionnement de cet appareil et nous apporter son aide dans la prise des tracés.

dier était celui d'un poste diathermique à ondes entretenues de 1.800.000 périodes environ par seconde. Nous devions donc nous adresser au troisième mode d'enregistrement, où, à défaut, au deuxième. Nous n'avions malheureusement à notre disposition qu'un courant de balayage de 800 périodes par seconde, fourni par un alternateur. Nous avons, par suite, eu recours au deuxième mode, mais nous fûmes rapidement obligés de l'abandonner, ne pouvant rien observer de précis en raison de la trop faible fréquence du courant accessoire par rapport à celle du courant étudié. Nous avons été réduit, dans ces conditions, à employer le premier mode d'inscription, en basse fréquence, où la rotation seule du cylindre assure l'étalement en fonction du temps.

Les ondes élémentaires de haute fréquence ne sont pas visibles dans ces conditions, mais les trains d'ondes le sont particulièrement, si bien que le tracé fournit, non une analyse, mais une véritable vue synthétique du phénomène étudié. C'est là d'ailleurs une circonstance favorable à nos recherches, seul l'ensemble du phénomène nous intéressant et le redressement du courant devenant évident avec de tels tracés.

Dans les conditions de nos expériences, la déviation de la tache cathodique était de 1 millimètre pour une différence de potentiel de 10 volts entre les armatures du condensateur déviateur de l'oscillographe ; la rotation du cylindre était de 10 tours par seconde.

Les tracés reproduits plus loin sont réduits des $\frac{2}{3}$ environ.

§ 2. ENREGISTREMENT OSCILLOGRAPHIQUE DES COURANTS DIATHERMIQUES AVANT ET APRES REDRESSEMENT

Nous avons oscillographié les courants diathermiques fournis par un poste à une lampe. Il s'agissait en l'espèce d'un poste Chenaille à lampe à 300 watts alimentée par le courant alternatif brut du secteur (110 volts, 50 périodes). Le schéma de l'appareil est représenté (fig. 6, p. 37).

Les caractéristiques du circuit oscillant étaient :

Capacité du condensateur C : $2,6 \cdot 10^{-10}$ Farad.

Coefficient de self induction de la bobine de plaque :
 $3 \cdot 10^{-5}$ Henry.

La fréquence des oscillations était :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{CL}}$$

= 1.800.000 périodes par seconde à 10 % près.

La longueur d'onde λ était :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^6} = 166 \text{ mètres environ}$$

Dans le circuit d'utilisation du redresseur (fig. 14, p. 65), se trouvent une résistance variable R, le sujet pour

l'inscription des courbes de courant le traversant (non représenté sur le schéma), le shunt sh (pour l'enregistrement des courbes de courant) et l'oscillographe cathodique.

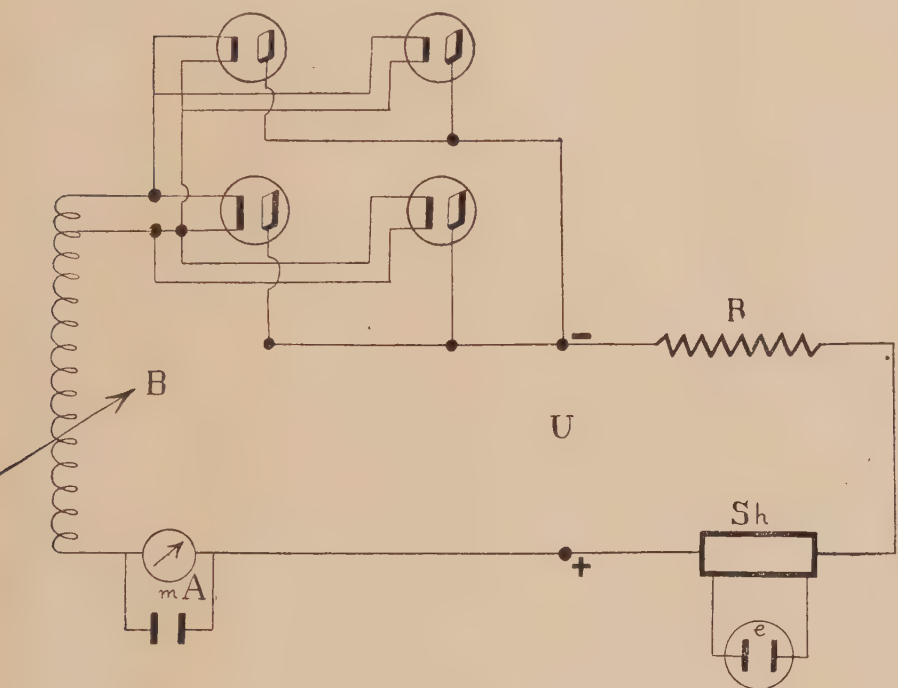


FIG. 19. — Schéma du redresseur, du circuit d'utilisation et d'oscillographie.

La résistance R est constituée par un tube isolant rempli d'eau pure, à l'intérieur duquel plongent des électrodes métalliques réglables à des distances variables l'une de l'autre ; cette résistance hydraulique est donc dénuée de toute self induction et de capacité appréciables.

Lors de l'inscription des courbes de tension, le circuit est ouvert au niveau du condensateur déviateur de l'oscillographe. Les armatures sont reliées chacune aux bornes du redresseur de haute fréquence. Le sujet n'est pas dans ce cas disposé dans le circuit.

Lors de l'inscription des courbes de courant, le circuit est fermé, d'après un dispositif préconisé par Dufour et Mesny, par un shunt, dépourvu de self et de capacité. Dans ce cas le sujet est intercalé dans le circuit d'utilisation ; il est disposé dans les mêmes conditions que pour un électro-diagnostic (l'électrode indifférente sur la face antérieure de l'avant-bras, l'électrode active étant tantôt sur le trajet du nerf médian au poignet, tantôt sur les muscles de l'éminence thénar).

La disposition de l'oscillographe est par suite variable suivant que l'on inscrit une courbe de tension ou une courbe de courant. Il peut être mis :

1°) SOIT « EN SÉRIE » dans le circuit d'utilisation, ouvert par suite entre les bornes du condensateur déviateur ; l'appareil diathermique ne débite pas ; c'est une courbe de tension que donne l'enregistrement, tension variable avec le degré de couplage des deux bobines plaque et grille du poste.

2°) SOIT « EN DÉRIVATION » sur le circuit d'utilisation (le sujet est, dans ce cas, disposé en série dans le circuit), par l'intermédiaire du shunt sh, qui, fermant le circuit, fait débiter le poste diathermique ; c'est une véritable courbe d'intensité que l'on obtient alors.

Nous avons utilisé le procédé du shunt pour étudier les courbes de courant traversant le sujet pour opérer

constamment avec le même tube cathodique et le même tube déviateur, l'oscillographe ayant été monté pour l'inscription industrielle des courbes de tension.

Ce procédé d'inscription des courbes de courant diffère du procédé classique de Dufour qui utilise la déviation de la tache cathodique par un champ magnétique, en faisant passer le courant étudié dans un solénoïde. Dans nos essais d'oscillographie, alors qu'il nous était impossible d'opérer selon le mode d'enregistrement en haute-fréquence, le procédé du shunt, s'il ne nous donnait pas la véritable allure de notre courant, nous permettait d'en obtenir une vue d'ensemble satisfaisante.

1. Enregistrement « en moyenne fréquence » des courants diathermiques non redressés.

Nous avons essayé d'oscillographier les courants fournis par un poste diathermique à éclateur et un poste diathermique à lampe. A priori, nous ne devons pas pouvoir déceler les oscillations élémentaires, constituant le courant de haute fréquence, puisque nous ne possédions qu'un *courant auxiliaire* de 800 périodes par seconde, fourni par un alternateur, de fréquence beaucoup trop faible par rapport à celle du courant étudié.

Nous n'avons pas pu oscillographier le courant fourni par un poste diathermique à éclateur, le tracé ne montrant même pas un léger décrochement au début des trains d'ondes.

Nous avons effectué un essai avec un poste diathermique à lampe, avant tout redressement. Ce courant devait

fournir, à priori, un tracé comportant des périodes égales d'oscillations et de silence, puisque la lampe oscillatrice ne pouvait être traversée que par une alternance du courant alternatif l'alimentant.

Nous avons obtenu par ce procédé (fig. 20), avec un courant auxiliaire de balayage à 800 périodes par seconde

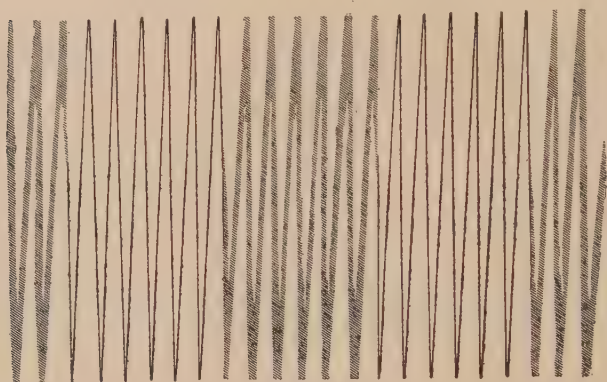


FIG. 20. — Tracé oscillographique avec un *balayage* de 800 périodes par seconde. Les oscillations de haute fréquence n'apparaissent pas nettement, mais elles rendent plus épais le tracé du balayage dans les parties qui correspondent à une demi-période ($1/100^e$ de seconde) du courant alternatif du secteur.

de, un tracé comportant nettement deux variétés de zones différentes : une première série de zones présente le courant de balayage parfaitement mince et net où l'absence des oscillations est manifeste ; une deuxième série montre le tracé du balayage épaissi, et cet élargissement forme des bandes striées transversalement, qui témoignent de l'existence des oscillations électriques. Les ondes élémentaires ne sont pas visibles, c'est leur ensemble seul

qui est décelé par l'existence de ces bandes. Les durées correspondantes des deux zones sont rigoureusement égales. Le cylindre enregistreur tournant à raison de 10 tours par seconde, et la fréquence du courant de balayage étant connue, il est facile de voir sur la courbe (la figure ne reproduit qu'une partie de l'enregistrement) que la durée de chacune des zones est de $1/100^{\circ}$ de seconde, ce qui correspond bien à la fréquence (50 périodes par seconde) du courant alternatif alimentant le poste diathermique. Ce tracé met déjà en évidence le fonctionnement d'un appareil diathermique à lampe, alimenté par un courant alternatif, pendant une alternance sur deux, c'est-à-dire chaque fois que le potentiel de la plaque de la lampe triode est supérieur à celui du filament.

2. Enregistrement « en basse fréquence ».

a) ENREGISTREMENT DU COURANT DIATHERMIQUE

Le mode d'oscillographie en « *basse fréquence* » n'analyse pas le phénomène de haute fréquence, trop rapide, en décelant les ondes élémentaires qui le constituent mais il en donne une véritable synthèse en montrant son allure générale.

Le tracé du courant diathermique fourni par un poste à lampe triode, se compose d'une série de surfaces noires ovoïdales dont le grand axe se confond avec l'axe des potentiels nuls et qui ont une longueur correspondant sensiblement à $1/100$ sec. (la rotation du cylindre enregistreur est de 10 tours par seconde); ces surfaces ovoïdales, formées par les oscillations très rapprochées

du spot de l'oscillographe sont séparées par des intervalles égaux de $1/100$ seconde. On vérifie là encore, par ce fait, qu'un appareil diathermique à une seule lampe

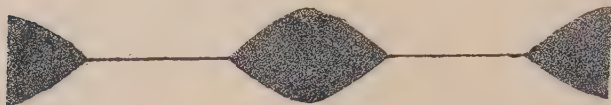


FIG. 21: — Surfaces ombrées ovoïdales dues aux vibrations du spot donnant le tracé oscillographique, *sans balayage*, du courant de haute fréquence, non redressé : le courant n'est produit que pendant une demi-période. Fréquence de 1.800.000.

triode donne des ondes entretenues pendant la moitié seulement de chaque période du courant alternatif du secteur d'alimentation ; l'autre moitié pendant laquelle la plaque de la lampe est à un potentiel inférieur à celui du filament, correspond à un temps de silence.

b) ENREGISTREMENT DU COURANT DIATHERMIQUE REDRESSÉ

L'enregistrement du courant de haute fréquence redressé, après interposition du redresseur de Cluzet et Chevallier entre le poste générateur et l'oscillographe montre que seules subsistent les oscillations situées d'un même côté de l'axe des potentiels nuls ; la hauteur des tracés correspondant à la tension du courant redressé est fonction de différents facteurs : de la tension du courant produit par le générateur, du potentiel de chauffage des filaments (et, par suite, du courant de saturation des valves du redresseur), enfin de la résistance du circuit

d'utilisation. Nous avons enregistré le courant de haute fréquence redressé, soit en circuit ouvert, soit en circuit fermé, en disposant alors, dans le circuit d'utilisation, des résistances fortes (100.000 ou 200.000 ohms) ou des résistances plus faibles, voisines de la résistance du corps humain pour les courants de H. F. (quelques centaines d'ohms). Dans tous ces essais, le générateur de H. F. était maintenu au même régime.



FIG. 22. — Surfaces ombrées ovoïdales dues aux vibrations du spot donnant le tracé oscillographique, *sans balayage*, du courant de haute fréquence redressé : le courant n'est produit que pendant une demi-période. Fréquence de 1.800.000.

En circuit ouvert (fig. 22), l'appareil ne débitant pas, on obtient une série de surfaces demi-ovoïdales, situées du même côté de l'axe des potentiels nuls, d'une durée de $1/100^{\circ}$ de seconde environ, et séparées par des intervalles de même durée.

Les oscillations uni-directionnelles sont distinctes sur toute leur hauteur, depuis la courbe ovoïdale enveloppante jusqu'à l'axe des potentiels nuls. Nous indiquerons plus loin les caractéristiques de notre circuit dans les différentes expériences.

En circuit fermé l'appareil à H. F. débite, l'oscillographe est en dérivation sur le shunt et donne une courbe de courant et non plus de tension seule. Le tracé obtenu varie alors avec l'importance de la résistance R, en série dans le circuit d'utilisation.

Si la résistance est forte (100.000 ou 200.000 ohms), les ovoïdes obtenus ont, dans les mêmes conditions, la même hauteur que précédemment, mais les oscillations ne descendent plus jusqu'à l'axe des potentiels nuls ; elles s'unissent à une certaine hauteur, et le spot de l'oscillographe dessine, à ce niveau, une courbe concavé vers l'axe des potentiels nuls formant l'enveloppante inférieure de la zone d'oscillations. Le tracé revêt alors



FIG. 23. — Surfaces ombrées demi-ovoïdales donnant le tracé oscillographique du courant de haute fréquence redressé, en circuit fermé, la résistance en série dans le circuit étant de 100.000 ohms.

l'aspect d'un croissant allongé, dont l'épaisseur diminue aux deux extrémités à mesure qu'on s'approche de l'axe des potentiels nuls. Notons que, dans ces conditions, l'excitation en un point moteur du muscle ou du nerf produit une tétanisation forte, ne s'accompagnant pas de douleur ou de sensation de brûlure, même si elle est violente.

Si la résistance est faible, les phénomènes sont tout différents. A mesure que la résistance du circuit d'utilisation diminue, l'épaisseur maxima du croissant, tracé par l'oscillographe, diminue, et lorsque la résistance n'est plus que de 200 ohms (ou de quelques centaines d'ohms, voisine de celle du corps humain pour les courants de haute fréquence), elle devient pratiquement nulle et se réduit à l'enveloppante supérieure des tracés

précédents. Les ondes à haute fréquence ont donc disparu et il ne reste plus qu'un courant de fréquence 50, uni-directionnel, dont les demi-ondes, séparées par des périodes de silence de $1/100^{\circ}$ de seconde, constituent un courant analogue à du courant alternatif redressé, et non filtré, de 50 périodes. D'ailleurs, on retrouve ici les



FIG. 24. — Croissants ombrés dus aux vibrations du spot, donnant le tracé oscillographique du courant de haute fréquence redressé ; la résistance du circuit étant égale à 10.000 ohms.

effets moteurs produits par un tel courant avec tétanisation douloureuse et sensation de brûlure à l'électrode active. De l'étude graphique et excito-motrice de ces deux cas, il ressort donc que les ondes de H. F., produites par un poste à lampe de diathermie (poste de Chennaille, dont le secondaire du circuit oscillant a 5 tours de spire) et redressées par des valves, se maintiennent bien dans un circuit d'oscillation fortement résistant (100.000 ou 200.000 ohms), mais la partie distincte des ondes diminue à mesure que la résistance décroît, et cette partie disparaît lorsque la résistance n'est plus que de quelques centaines d'ohms ; il n'y a plus alors de haute fréquence redressée, et nous reviendrons sur ce fait.

La présence ou l'absence de la H. F. redressée semble donc bien dépendre de la résistance du circuit d'utilisa-

tion ; nous avons cherché si c'est là le seul facteur qui puisse entrer en ligne de compte. Nous avons augmenté la tension du courant émis par le poste Chenaille, en remplaçant la bobine secondaire (5 spires) par une bobine de 32 centimètres de diamètre extérieur, et de 25 tours de spires, donnant une tension dix fois plus forte environ et d'axe commun avec celui de la bobine fixe,



FIG. 25. — Tracé oscillographique obtenu avec une forte tension et une résistance en série de 200 ohms et montrant la simple diminution d'amplitude des oscillations de la haute fréquence redressée ; les oscillations persistent malgré la faible résistance du circuit.

ce qui nous donnait le maximum de tension. L'augmentation de tension nous permet, en circuit fermé sur une résistance forte, d'avoir des étincelles de 3 à 4 millimètres aux clefs de Morse du redresseur, alors qu'avec l'appareil de Chenaille, muni de la bobine primitive, on n'avait jamais pu en obtenir. On constate, dans ces conditions, que si la résistance du circuit d'utilisation diminue de plus en plus, les ondes de haute fréquence redressées persistent plus longtemps que lorsque la tension du courant générateur est faible ; c'est ainsi qu'avec 200 ohms seulement, et le sujet dans le circuit, ou même avec le sujet seul, on a encore un croissant formé par les ondes uni-directionnelles de haute fréquence. Le tracé de la figure 25 a été obtenu dans ces conditions de faible résistance, mais avec un potentiel de chauffage des filaments des valves de 5 volts seulement. Le croissant est

alors modifié en ce sens que la limite supérieure de la surface ovoïdale n'a pu être atteinte, mais si l'on prolonge, par exemple, par la pensée, les extrémités du tracé, on obtient une courbe semblable aux précédentes. L'aplatissement du croissant est dû à ce fait qu'en abaissant légèrement le taux d'émission électronique, alors que la tension plaque augmentait, le courant plaque atteignait rapidement le courant de saturation, conformément aux courbes de fonctionnement des kénotrons et lampes triodes. On peut admettre que, pour une émission électronique suffisante, en accord avec la valeur élevée de la tension plaque, l'enveloppante supérieure de notre tracé atteindrait la même hauteur que dans les autres cas. Quoi qu'il en soit, l'enregistrement montre que la haute fréquence persiste avec des tensions convenables, même si la résistance du circuit d'utilisation n'est que de quelques centaines d'ohms.

D'ailleurs, avec cette forte tension et ce faible chauffage des filaments, l'excitation des muscles de l'émittance thénar et celle du médian au poignet se produit à 0,3 milliampères, avec ou sans résistance dans le circuit, de sorte que le rôle de celle-ci apparaît nul dans ce cas, et que ce qui importe pratiquement, c'est la seule valeur de la tension aux électrodes.

Nous avons résumé, dans le tableau ci-dessus, les conditions dans lesquelles les tracés reproduits plus haut ont été obtenus, le générateur à haute fréquence étant toujours maintenu au même régime pendant tous les essais. La tension maxima aux bornes du shunt est e , mesurée sur les tracés oscillographiques (1 millimètre = 10 volts). En supposant exacte la loi d'Ohm en

haute fréquence, la tension U maxima aux bornes du redresseur est donnée par

$$\left[U_{\max} = e \frac{R}{sh} \right]$$

où R et Sh sont les valeurs de la résistance en série dans le circuit d'utilisation et du shunt (résistances sans selfs). Nous indiquons, dans la colonne Intensité, le chiffre fourni par lecture d'un milliampèremètre électro-magnétique polarisé à cadre, shunté par un condensateur, et disposé à la sortie du redresseur.

L'examen de ce tableau et des tracés montre ce que l'on doit distinguer entre la haute fréquence redressée à basse tension et à haute tension. Si toutefois le circuit est ouvert, les deux courbes de tension sont morphologiquement identiques, ne différant entre elles que par la valeur plus ou moins grande des tensions maxima. Si le circuit est fermé, il faut considérer deux cas :

1° *En basse tension*, la résistance du circuit d'utilisation a une influence primordiale. Si cette résistance est grande, de l'ordre de 100.000 ou 200.000 ohms, la haute fréquence redressée passe dans le circuit où l'oscillographe l'enregistre ; mais si elle décroît, la H. F. redressée diminue parallèlement et disparaît lorsque sa valeur n'est plus que de quelques centaines d'ohms, toutes les conditions étant restées les mêmes. C'est là un phénomène quelque peu paradoxal, puisque la diminution de la résistance n'est pas, d'habitude, une cause d'arrêt ou d'extinction de la haute fréquence. Il se produit sans doute un phénomène de « désaccrochage » ou de « non accrochage » de la lampe triode du générateur de haute fré-

Conditions dans lesquelles les tracés reproduits ci-contre ont été obtenus

NUMÉROS DES TRACÉS	BOBINE B		REDRESSEUR		RÉSISTANCES du circuit d'utilisation		TENSIONS		ASPECT des TRACÉS
	Nombre de spires	Couplage	chauffage en V. des filaments	Intensité en milliam- pères	R Ω	Sh Ω	ev max.	U _v max.	
2 (fig. 21).....	5	fort	—	—	10.000	2.000	240	1.200	surfaces ovoïdales.
3 (fig. 22).....	5	fort	4	1,8	10.000	circuit ouvert	180	forte	surfaces semi-ovoï- dales.
4 (fig. 23).....	5	fort	6	2,5	100.000	10.000	250	250	surfaces en croissant.
H.F. non redressée en haute tension (tracé non reproduit).....	25	très fort	—	—	200.000	10.000	180	3.600	même aspect que pour le tracé 2 (fig. 21).
H.F. redressée en haute tension (tracé non re- produit).....	25	très fort	6	1,8	200.000	10.000	370	6.400	même aspect que pour le tracé 4.
6 (fig. 8).....	25	très fort	5	4	300	circuit fermé h. faible	140	2.600	croissant aplati.

quence, qui n'oscille plus ; mais ce n'est là qu'une simple constatation, qui ne donne pas la cause véritable du phénomène. Nous n'avons pas vu, pour notre part, pourquoi la haute fréquence disparaît par suite de la diminution de la résistance du circuit d'utilisation.

2° *En haute tension*, la résistance n'a pratiquement pas d'influence sur la haute fréquence redressée qui circule toujours dans le circuit d'utilisation, même lorsqu'un sujet constitue à lui seul toute la résistance.

En résumé, l'étude oscillographique des courants de haute fréquence redressés montre qu'en basse tension ces courants sont formés d'ondes distinctes les unes des autres, sur toute leur hauteur, quand le circuit d'utilisation est ouvert ou très résistant ; mais ces ondes redressées s'élargissent et s'unissent les unes aux autres, d'autant plus près de leur sommet que la résistance du circuit d'utilisation diminue. Quand les ondes de haute fréquence s'unissent à leur sommet même, on n'a plus qu'une onde de basse fréquence redressée à chaque période du courant alternatif du secteur alimentant le poste générateur. Cette étude montre qu'en plus haute tension les ondes restent toujours distinctes les unes des autres, indépendamment de la valeur de la résistance du circuit d'utilisation et qu'elles ne disparaissent jamais.

Par suite, les phénomènes d'excitation observés après le redressement des courants diathermiques, produits par les postes à lampe, peuvent être dus, suivant la valeur de la tension entre les électrodes, soit à des ondes uni-directionnelles de haute fréquence, soit à des ondes uni-directionnelles ayant seulement la fréquence du courant alternatif du secteur.

§ 3. ENREGISTREMENT OSCILLOGRAPHIQUE DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE A ONDES RIGOUREUSEMENT ENTRETENUES

Nous n'avons pu procéder à aucun enregistrement de courants de haute fréquence formés d'ondes rigoureusement entretenues fournis par des lampes oscillatrices comme dans les postes de T. S. F. (nous n'avions pas encore à notre disposition un tel poste) ; nous passerons sous silence les recherches qui ont trait à ce mode d'analyse des courants de haute fréquence, parce que, sous leur forme, elles ne se rapportent que de très loin à notre travail.

Il existe d'ailleurs peu de chose à ce sujet dans la littérature. Nous signalerons simplement pour mémoire les études d'Alberti et Zickner (1922), qui, avec le tube de Braune, ont oscillographié des courants dont les longueurs d'ondes étaient comprises entre 1.000 et 1.800 mètres. Ces courants étaient produits par des lampes à trois électrodes et ces auteurs enregistrèrent la forme du courant oscillant, étudièrent par ce procédé la tension plaque, la tension grille et le courant grille, en étudiant les rapports de phase de ces quatre éléments.

MM. Dufour et Mesny utilisèrent plus tard (1923) l'oscillographe cathodique pour l'étude des oscillateurs à ondes entretenues.

Le courant oscillant était étudié, selon la méthode de Dufour, par voie magnétique à l'aide d'un petit solénoïde connecté à demeure dans le circuit oscillant.

Les tracés de tension plaque et de tension grille étaient obtenus par la méthode habituelle grâce à la déviation du pinceau cathodique par un champ électrostatique. Le courant plaque était obtenu par le procédé du shunt, à travers lequel débitait le générateur de haute fréquence ; le condensateur de l'oscillographe étant connecté aux bornes du shunt.

MM. Dufour et Mesny étudièrent également les différences de phase du courant et de la tension, par la méthode des *figures de Lissajous*, où ces deux grandeurs agissent simultanément à angle droit sur le faisceau cathodique, avec ou sans balayage.

Dufour et Mesny étudièrent ainsi le fonctionnement des lampes à trois électrodes comme générateurs d'ondes entretenues, suivant différents montages : en Tesla (à inductance grille séparée), en Oudin (à inductance grille commune avec le circuit oscillant) et en dérivation.

Nous n'avons pas à exposer les résultats, d'ordre technique, obtenus par ces auteurs ; ils sont remarquablement exposés par eux dans « *l'Onde Electrique* » (1923).

Nous signalerons simplement une partie de leurs conclusions ; Dufour et Mesny montrent que c'est le montage en dérivation d'un oscillateur qui donne les courants et les tensions les plus classiques, par suite de la diminution des spires mortes, de la diminution et de la simplicité des couplages, ce qui diminue l'importance et le nombre des harmoniques.

L'analogie d'un oscillateur avec un pendule est vérifiée et renforcée par les recherches de ces auteurs. Le courant oscillant est l'homologue du pendule, la tension grille déclanche l'impulsion d'entretien et le courant plaque joue le rôle de l'action motrice compensant les frottements.

Une lampe à trois électrodes fournit donc bien des ondes entretenues, égales entre elles, continues et dépourvues de toute période intermédiaire de silence.

Avec de tels courants, nous avons donc la possibilité d'opérer nos recherches physiologiques avec des ondes toujours semblables à elles-mêmes, toutes choses égales d'ailleurs.

CHAPITRE IV

Propriétés physiques des courants de haute fréquence redressés

Les courants de haute fréquence redressés étant obtenus par une modification des courants de haute fréquence, conservent quelques propriétés de ceux-ci, et acquièrent du fait de cette modification (qui consiste essentiellement en une polarisation) de nouvelles propriétés physiques.

L'origine oscillatoire et la polarité des courants de H. F. R. constituent donc deux faits essentiels qui conditionnent les propriétés physiques de ces courants.

A. PROPRIETES PHYSIQUES DUES A L'ORIGINE OSCILLATOIRE DES COURANTS DE H. F. R.

1. Généralités.

Les expressions classiques utilisées pour décrire et caractériser les courants alternatifs ne sont pas applicables avec leur sens physique, aux courants de H. F. R. Ainsi on ne pourra plus parler d'*ondes*, de *période* et de *longueur d'onde*, puisque les courants redressés ne comportent plus que des *alternances* de même sens.

Il est par contre facile de caractériser ces courants par leur *fréquence* en désignant par ce terme le nombre de demi-ondes élémentaires qu'ils présentent en une seconde.

La fréquence des courants de H. F. R. est, ainsi que nous l'avons déjà signalé, différente selon leur mode d'obtention, à partir d'un courant de haute fréquence donné.

La fréquence d'un courant de haute fréquence redressé sera en effet égale ou double de celle du courant dont il dérive, suivant que la polarisation sera obtenue par l'utilisation d'une seule ou des deux alternances.

Nous verrons d'ailleurs, plus loin, qu'il est facile de connaître la fréquence d'un courant de haute fréquence par la mesure de la longueur d'onde grâce à un ondemètre ; il est par suite très simple d'en déduire la fréquence du courant redressé.

2. Comportement des courants de H. F. R. vis-à-vis de la loi de Joule.

Nous avons étudié le pouvoir thermogène de ces courants en fonction des facteurs classiques entrant dans l'expression de la loi de Joule.

Nous verrons que, dans *certaines conditions*, le dégagement de chaleur produit par ces courants *semble* ne pas suivre la loi de Joule.

Cet écart n'est *probablement* qu'apparent et au cours de notre discussion nous utiliserons des faits et raisonnements mis en évidence par A. Broca, Chanoz, d'Arsonval et Fabry, pour montrer que ce pouvoir thermogène, comme celui des courants de haute fréquence, est vraisemblablement en accord avec la loi de Joule.

CONDITIONS DE NOTRE EXPÉRIMENTATION

Nous avons étudié le pouvoir calorifique des courants de H. F. R. avec des corps liquides, soit des solutions électrolytiques, soit d'autres corps tels que l'eau distillée, l'urine, le pétrole.

Le corps choisi était déposé dans un vase cylindré *de verre* placé dans une enceinte d'air hermétiquement close. Le vase de verre permettait au courant électrique de se répartir de façon sensiblement égale entre les électrodes, et d'éliminer ainsi le cheminement des lignes de flux sur les parois, phénomène qui se serait produit (en accord avec la théorie de Lord Kelvin) si le vase avait été métallique. Signalons cependant que A. Broca et

Turchini montrèrent qu'en haute fréquence l'effet Kelvin ne s'observe pas fatalement (aussi bien pour les électrolytes que pour les conducteurs métalliques), la résistance pouvant être plus faible ou plus forte qu'en continu.

Quoi qu'il en soit la chaleur produite était localisée dans le corps étudié et théoriquement aussi dans l'enceinte d'air extérieure au vase. Nous n'avons pas observé d'élévation de température de l'enceinte, les intensités employées étant trop faibles. La température du liquide était prise par un thermomètre à *alcool*, pour éliminer l'influence des courants de Foucault, et vérifiée par un thermomètre sensible à mercure en dehors des temps de passage du courant (au début et à la fin de l'expérience).

Le courant de haute fréquence, redressé arrivait au liquide par deux électrodes de platine ayant la forme de deux fines aiguilles ou de deux lames de 5 ou de 1 centimètre carrés. La tension était donnée par un voltmètre électrostatique, et l'intensité par un milliampèremètre thermique.

La fréquence du courant issu d'un poste diathermique à lampe ou à éclateur fut maintenue constante dans toutes les expériences de façon à ne pas modifier la *résistance vraie* du corps étudié.

a) DÉGAGEMENT DE CHALEUR EN FONCTION DE LA DURÉE
DE PASSAGE DU COURANT

Nous avons mesuré les quantités de chaleur dégagées par différents courants de H. F. R., et nous avons constaté qu'elles augmentaient toujours proportionnellement

aux durées de passage du courant. Nous avons toujours observé cette proportionnalité quelle que soit la forme des électrodes ; seules variaient, en fonction de ce facteur, les quantités de chaleur dégagée.

b) DÉGAGEMENT DE CHALEUR PAR LES COURANTS DE H. F.
ET DE H. F. R. EN FONCTION DE LA RÉSISTANCE

D'Arsonval signalait en 1927 que les courants de H. F. ne suivent pas la loi de Joule. Il trouve que dans un circuit comprenant une cuve en verre, des électrodes pourvues d'une certaine surface et d'un liquide contenu dans la cuve, les élévations de température produites par un courant de H. F. ne sont pas proportionnelles aux élévations de la résistance. D'Arsonval utilise différents liquides (solution électrolytique, eau de Marne, sérum de cheval, urine) et constate que les élévations de température passent par un maximum, pour décroître rapidement alors que la résistance continue à croître, tous les facteurs expérimentaux autres que la résistance étant restés les mêmes.

Nous avons examiné dans les conditions expérimentales précédemment indiquées (analogues à celles de d'Arsonval) les dégagements de chaleur produits par un courant de H. F. d'une part, et par un courant de H.F.R. dans les mêmes conditions, d'autre part.

Nous ne rapportons que le cas où les électrodes ont une surface appréciable (1 centimètre carré), pour apporter des résultats de même ordre que ceux de d'Arsonval.

Voici par exemple le résultat d'une série d'expériences faites avec un courant diathermique (appareil à éclateur)

de 100 milliampères, passant pendant 2 minutes dans 10 centimètres cubes d'une solution de NaCl de résistance croissante (par addition d'eau distillée).

Ohms R (en continu)	$\frac{d\theta}{H F_F}$	$\frac{d\theta}{H. F. R.}$
15w	1,2°	1,4°
70	2,2	2,4
150	4,6	4,4
400	12,6	8,4
800	20	13,2
1500	28	
3000	24,6	
10000	15	
16000	3,4	
27000	2,2	

On voit donc :

a) Que les courants de haute fréquence dégagent dans les électrolytes des quantités de chaleur¹ qui augmentent d'abord avec la résistance du corps parcouru, puis que ces quantités diminuent rapidement alors que la résistance continue à croître. C'est ainsi que le dégagement de chaleur passe par un maximum pour 1.500 ohms et qu'il est le même pour 70 et 27.000 ohms, toutes choses égales d'ailleurs.

On voit également que les élévations de température ne sont pas proportionnelles aux augmentations de résistance, ainsi que l'avait constaté d'Arsonval.

b) Que les courants de haute fréquence redressés dégagent des quantités de chaleur qui augmentent en fonc-

tion de la résistance croissante du corps considéré jusqu'à ce que cette résistance soit assez forte pour diminuer puis arrêter complètement ce courant, en accord avec la loi d'Ohm.

Nous ne savons pas si les courants de haute fréquence redressés offrent un maximum de dégagement de chaleur comme ceux de haute fréquence puisque l'intensité du courant admis à traverser la solution diminuait peu avant d'atteindre 1500 ohms (résistance correspondant au maximum de dégagement calorifique pour la haute fréquence).

Quoi qu'il en soit, les variations d' θ' ne sont pas proportionnelles aux augmentations de résistance et un premier écart semble ainsi exister nettement vis à vis de la loi de Joule.

c) DÉGAGEMENT DE CHALEUR EN FONCTION DU CARRÉ
DE L'INTENSITÉ DU COURANT

Si l'on considère deux conducteurs liquides, identiques, traversés par deux courants de haute fréquence redressés identiques (qualitativement et quantitativement), on constate que les quantités de chaleur dégagées en des temps égaux, sont différentes suivant la surface des électrodes.

La quantité de chaleur dégagée lorsque le circuit traversant le conducteur échauffé est dépourvu de toute capacité est supérieure à celle qui est produite lorsque le circuit présente une certaine capacité.

Nous avons constaté ce fait en utilisant, dans des conditions expérimentales identiques, des électrodes filifor-

mes de platine, dépourvues pratiquement de toute capacité, et des électrodes lamellaires, provoquant l'apparition de phénomènes de capacité ; nous utilisons dans ce cas une petite cellule d'Ostwald (utilisée d'ordinaire pour la mesure des résistivités) présentant deux électrodes de platine ayant chacune un centimètre carré de surface.

Voici d'ailleurs le résultat de deux expériences faites dans les mêmes conditions : courant diathermique redressé (appareil à lampe) — 100 cc³ d'une solution électrolytique de R ohmique = 100 ohms — durée de passage du courant : 10 minutes.

Intensité (milliampère)	d θ° circuit sans capacité	d θ° (circuit avec capacité)
40	0,6	0,3
100	4,4	1,7

Les résultats de ces expériences ne font pas entrer en ligne de compte pour la mesure des quantités de chaleur dégagée, l'énergie calorifique qui intervient lors de l'électrolyse de la solution. Nous n'avons pas tenu compte de ce facteur dans l'évaluation de la chaleur produite, nous étant placé dans des circonstances analogues à celles du P^r d'Arsonval lors de ses recherches sur le pouvoir thermogène des courants de haute fréquence.

Il semble donc bien se dégager de nos essais deux faits :

a) Il n'y a pas proportionnalité entre les quantités de chaleur dégagée et le carré des intensités, quel que soit le circuit de haute fréquence, c'est-à-dire que les électrodes soient filiformes (sans capacité) ou douées d'une certaine surface présentant une certaine capacité). Les

écarts observés entre les rapports $\frac{Q}{Q'}$ des quantités de chaleur dégagée et les rapports des carrés $\frac{I'^2}{I^2}$ correspondants sont trop accentués pour être attribués à des erreurs de mesure (5 et 25 — 7 et 16 par exemple dans certaines de nos expériences).

b) Les quantités de chaleur dégagées dans le même circuit et dans les mêmes conditions sont différentes suivant les dimensions des électrodes. Si celles-ci sont filiformes (aiguilles de platine) les quantités de chaleur dégagée sont supérieures à celles qui se produisent si les électrodes ont une certaine surface (lames de 1 centimètre carré de platine par exemple).

Il semble donc qu'il existe un écart marqué entre les quantités de chaleur mesurées expérimentalement et celles que permet de prévoir la loi de Joule.

On peut se demander toutefois *si cet écart est réel ou s'il n'est qu'apparent*.

1°) *En ce qui concerne les courants de H. F.*, on peut montrer que cet écart n'est qu'apparent en se rappelant d'une part ce que représente réellement un courant alternatif et en cherchant d'autre part comment se comporte en H. F. un circuit comportant une certaine capacité.

On sait tout d'abord qu'un courant alternatif est produit par une force électromotrice E variant, dans sa forme la plus simple, suivant une sinusoïde ; il en est de même pour l'intensité I , de sorte qu'on écrit :

$$E = E_0 \sin \omega t$$

$$I = I_0 \sin (\omega t - \varphi)$$

où E_0 et I_0 représentent les maxima de E et de I , ω la

pulsation et où φ désigne en grandeur et en signe l'*angle de déphasage*, ou le *déphasage* de I par rapport à E ; par suite E et I ne présentent pas forcément leur maximum au même instant. Le déphasage disparaît seulement lorsque le circuit est constitué par une résistance sans self ni capacité ; intensité et force électromotrice sont alors *en phase*.

Si un courant alternatif traverse un circuit comportant self, capacité et résistance, l'expression de la force électromotrice efficace devient :

$$E_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega} \right)^2}$$

où $\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega} \right)^2}$ est l'*impédance* du circuit (résistance apparente en courant alternatif, jouant le même rôle que la résistance R en continu), où L , R et C . représentent respectivement la self, la résistance *ohmique* et la capacité du circuit. Le terme $\left(\omega L - \frac{1}{C\omega} \right)$ est la *réactance* du circuit. Impédance et réactance dépendent de la pulsation, donc de la fréquence du courant.

Le déphasage φ est donné par la valeur de sa tangente :

$$\text{tang } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

Si l'on désigne par $\hat{X}$ la réactance, et par Z l'impédance, le calcul montre que l'on peut obtenir la valeur de l'intensité efficace I d'un courant alternatif en cons-

truisant un triangle rectangle dont les côtés de l'angle droit sont représentés par des *vecteurs* de valeur EX/Z^2 et ER/Z^2 (fig. 28) et dont l'hypothénuse sera I si l'angle AOB est égal au déphasage φ .

Le courant I peut donc être considéré comme constitué par deux composantes, une composante ER/Z^2 en phase, *composante wattée* ou *active* du courant, et une

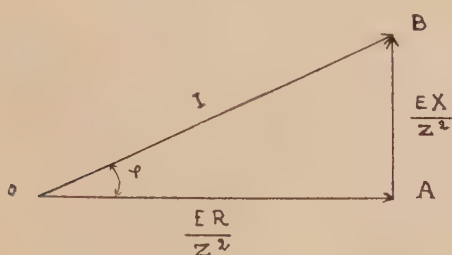


FIG. 26. — Schéma représentant les deux composantes d'un courant alternatif.

composante EX/Z^2 , *composante déwattée* ou *réactive* du courant. Plus l'angle de déphasage φ sera différent de 0, plus la composante déwattée sera importante et plus la puissance du courant sera faible.

Si l'on remonte d'autre part aux idées de Maxwell sur les *courants de déplacement* et les *courants de conduction*, on admet que dans les substances non isolantes, le courant total est formé de deux termes : le courant de conduction ou ordinaire, et le courant de déplacement ou courant diélectrique, *ce dernier existant seulement pendant les périodes variables*.

Les *courants diélectriques, déwattés*, éprouvent de la part du diélectrique une *résistance élastique* qui ne four-

nit aucune chaleur, tandis que les *courants de conduction, wattés*, éprouvent une *résistance visqueuse*, variable avec le conducteur considéré (caractérisée par la *constante de viscosité électrique* de A. Broca) et qui est la cause du dégagement de chaleur qu'ils produisent.

M. Chanoz signalait déjà en 1911, en s'appuyant sur les vues de Maxwell et de Broca, qu'un courant de haute fréquence parcourant un électrolyte ou le corps humain était la somme de deux courants différents, de conduction et de capacité. Le premier seul dégageant de la chaleur, le pouvoir thermogène d'un courant de haute fréquence est inférieur à celui que produirait un courant continu dans les mêmes conditions.

Si l'on considère maintenant ce qui se passe dans une cuve où se trouve un corps liquide et où plongent deux électrodes, on conçoit que la présence des deux électrodes possédant une surface appréciable, introduit dans le circuit un nouvel élément, une capacité, qui se surajoute à la résistance du conducteur envisagé.

Par suite, l'intensité du courant *total* indiquée par un ampèremètre est la somme de deux courants : d'abord d'un courant de conduction, puis d'un courant de capacité, le premier dégageant seul de la chaleur, le deuxième déwatté, n'ayant pas de pouvoir thermogène.

Ce fait fut utilisé par M. Fabry (1927) pour expliquer que le dégagement de chaleur avec les courants de haute fréquence est inférieur à celui qu'exige *en apparence* la loi de Joule.

M. Fabry dirige ainsi son raisonnement :

Soit un circuit de haute fréquence comportant une

cuve et deux électrodes de capacité C et de résistance R .

Si l'on a K = constante diélectrique ; C = résistivité (unités électromagnétiques C.G.S.) ; v = rapport des unités (numériquement égal à la vitesse de la lumière) ; a = facteur dépendant de la forme et des dimensions des électrodes, on peut écrire :

$$(1) \quad C = \frac{a}{4\pi} \frac{k}{v^2}$$

$$(2) \quad R = \frac{C}{a}$$

D'autre part, dans la résistance R passe un courant watté de valeur efficace I_1 qui dégage en une seconde l'énergie (chaleur):

$$(3) \quad P = RI_1^2$$

Dans la capacité C (cuve - liquide - électrodes) passe le courant déwatté I_2 qui ne dégage pas de chaleur.

I_1 et I_2 présentent un décalage de $\frac{\pi}{2}$.

Le courant total I indiqué par l'ampèremètre est tel que l'on ait :

$$(4) \quad I^2 = I_1^2 + I_2^2$$

avec

$$(5) \quad I_1 = \frac{E}{R} \quad \text{et}$$

$$(6) \quad I_2 = \omega CE$$

où ω est la pulsation du courant.

En éliminant I_2 et E entre (4) (5) et (6), puis en remplaçant C et R par leurs valeurs (1) et (2), il vient :

$$(7) \quad I^2 = I_1^2 \left(1 + \frac{\omega^2}{16 T^2 v^4} k^2 \rho^2 \right)$$

qui fournit une relation, indépendante des électrodes, entre le courant watté, producteur de chaleur, et le courant mesuré.

En portant cette valeur dans (3), on a l'expression de la chaleur produite en fonction du courant mesuré à l'ampèremètre.

$$(8) \quad P = \frac{I^2}{a} \frac{\rho}{1 + \frac{\omega^2}{16 \pi^2 v^4} k^2 \rho^2}$$

Il apparaît bien ainsi que la puissance disponible et transformable en chaleur, $P = RI^2$, est forcément *plus petite* (ou tout au plus égale) que la puissance théoriquement disponible $P = RI^2$ calculée à partir de l'intensité totale.

La discussion de l'équation (8) montre que le dégagement de chaleur s'annule pour

$$\rho = 0 \text{ et } \rho = \infty$$

c'est-à-dire lorsque le courant est entièrement déwatté.

Cette note de M. Fabry, qui survint à la suite de la communication du Professeur d'Arsonval à l'Académie des Sciences, explique les résultats expérimentaux obtenus par celui-ci. Le Professeur d'Arsonval écrivait que l'échauffement n'était pas dû uniquement à l'effet Joule et que l'ensemble cuve-électrodes-liquide in-

terposé constituait non seulement une résistance mais aussi un condensateur. Ce fait est exact, mais l'auteur ne pousse pas l'explication du côté du courant de capacité qui prend naissance dans un tel système, et qui n'a pas, on le sait, de pouvoir thermogène ; d'Arsonval explique alors le dégagement de chaleur par les courants de haute fréquence en faisant appel à des « *phénomènes d'hystérésis ou de viscosité diélectrique* », sans préciser leur mécanisme ni leur mode d'action.

M. Bordier écrit dans son livre que la loi de Joule n'est pas applicable aux courants de haute fréquence, en accord avec les expériences de d'Arsonval. Si cet auteur signale la référence concernant les travaux de ce dernier, il omet de parler de la note à la même Académie des Sciences de M. Fabry, publiée très peu de temps après celle de d'Arsonval et n'apporte pas de faits personnels confirmatifs.

Nous avons vu que M. Fabry explique le phénomène par la simple intervention des phénomènes de capacité. La simplicité et la logique du calcul exposé par M. Fabry ; la discussion de l'équation donnant la puissance de l'énergie transformable en chaleur fournissant des résultats concordants avec les résultats expérimentaux, font que l'on doit se rendre à ces vues.

2° *En ce qui concerne les courants de H. F. R.*, on peut se demander s'il est possible de leur appliquer le même raisonnement qu'aux courants de H. F. Cela est probable mais difficile à affirmer puisqu'il est impossible de déceler l'existence d'un dégagement maximum de chaleur, en fonction de la résistance, et qu'il s'agit de courants ne présentant plus qu'une série d'alternances

de même sens, qu'il est impossible de parler par suite de l'impulsion de tels courants (le facteur impulsion entrant dans la relation proposée par M. Fabry).

Cependant, en ayant recours aux idées de Maxwell qui montra que, de façon générale, le courant diélectrique n'existe que pendant les périodes variables, on peut considérer que l'état variable du courant de H. F. R. peut suffire pour expliquer l'apparition d'un courant diélectrique dans un circuit possédant une certaine capacité.

En résumé : Les quantités de chaleur produites par un courant de haute fréquence traversant un électrolyte semblent ne pas obéir à la loi de Joule. Cet écart n'est qu'apparent et cette loi explique les phénomènes observés si l'on considère que le circuit cuve-électrodes-liquide se comporte comme une résistance et une capacité, et que le courant de conduction, watté, est seul capable de produire de la chaleur.

Les courants de haute fréquence redressés présentent de même que les courants de H. F. un écart évident avec la loi de Joule, mais il est probable que cet écart est apparent bien qu'il s'agisse de courants de haute fréquence n'ayant qu'une seule série d'alternances, toutes de même sens.

B. PROPRIETES PHYSIQUES DUES A LA POLARITE DES COURANTS DE H. F. R.

Nous signalerons simplement quatre propriétés importantes des courants de haute fréquence redressés dues à leur polarité.

Les courants de H. F. R. sont en effet capables, comme les courants de sens constant, de produire l'électrolyse, de charger un condensateur (si leur tension est assez forte) ou une batterie d'accumulateur, d'exciter un tube à rayons X et d'influencer les galvanomètres polarisés.

1. Les courants de H. F. R. sont capables de produire l'électrolyse.

Il est facile de s'en rendre compte en utilisant un électrolyte quelconque. Ce fait n'a rien de spécial et obéit aux lois de Faraday. Nous signalerons simplement que ce phénomène, comme pour tous les courants polarisés, peut être utilisé comme un moyen de mesure précis de l'intensité d'un courant ou de la quantité d'électricité qu'il transporte.

Nous avons effectué plusieurs expériences de ce genre en utilisant notamment de l'eau distillée additionnée de 10 % d'acide sulfurique pur. Nous avons utilisé un voltamètre à eau acidulée et mesuré le temps nécessaire au dégagement de 1 cm³ d'hydrogène par des courants de

même intensité et même voltage mais de fréquence différente.

Nous avons constaté ainsi, *que la quantité d'électricité transportée par deux courants de même puissance apparente augmente proportionnellement à la fréquence*, ce qui n'est d'ailleurs pas surprenant.

Voici d'ailleurs, à titre d'exemple, le résultat d'une de nos expériences :

Fréquence du courant de H. F. R.	Voltage (volts)	Intensité efficace (mA)	Temps de dégagement de 1 cm ³ d'H.
4.300.000	45	7	19 minutes
940.000	45	7	23 minutes

Si l'on veut procéder à la mesure de l'intensité efficace d'un courant de haute fréquence redressé, il suffira d'employer un voltamètre à eau acidulée ou à azotate d'argent par exemple et de procéder :

1° A la mesure de la quantité d'électricité Q ayant déposé un certain poids de métal à la cathode, en se rappelant qu'un coulomb dépose au pôle négatif un poids p grammes de tout élément caractérisé par son équivalent électrochimique, rapport de son poids atomique A et de sa valeur n en conformité avec la formule classique de Faraday :

$$F = \frac{1}{93.600} \times \frac{A}{n}$$

2° A la mesure du temps t que le courant a mis à trans-

porter cette quantité d'électricité ; l'intensité étant donnée par la formule :

$$I \text{ ampères} = \frac{Q \text{ coulombs}}{t \text{ secondes}}$$

Il n'y a dans ce phénomène d'électrolyse aucun fait spécial, ce n'est là qu'une propriété générale des courants polarisés.

Nous verrons toutefois que cette propriété physique prend une importance considérable dans le domaine physiologique et conditionne les propriétés essentielles des courants de haute fréquence redressés.

Signalons en outre *qu'à intensités égales, l'électrolyse est plus importante avec le courant galvanique qu'avec les courants de haute fréquence redressés.*

2. Les courants de H. F. R. peuvent charger un condensateur ou un accumulateur.

Alors que les courants de haute fréquence chargent chaque armature d'un condensateur alternativement dans un sens et dans l'autre et se comportent comme s'ils le traversaient effectivement, les courants de H.F.R. chargent constamment chaque armature dans un sens constant. Il est bien connu que la quantité d'électricité emmagasinée par un condensateur est proportionnelle à la différence de potentiel appliquée aux armatures et qu'elle est donnée par la relation :

$$Q = CU$$

où C représente la capacité du condensateur et U la différence de potentiel qui est appliquée aux armatures.

Il est évident que les courants de H. F. R. obtenus à l'aide d'un dispositif de d'Arsonval, à bobine, pour l'obtention des courants de haute fréquence à haute tension sont les plus aptes à produire la charge des condensateurs. S'il s'agit de courants de H. F. R. obtenus à partir d'un poste diathermique comportant un transformateur à circuit magnétique fermé, la charge sera plus difficile à obtenir en raison de la tension relativement faible du courant.

En nous rappelant que la tension moyenne E_r du courant redressé, pendant une période, est $E_m/2$ (moitié de la tension moyenne du courant initial), si l'on n'utilise qu'une alternance et que l'on a $E_2 = E_0/\pi$, le condensateur se chargera aux « pointes » de tension, c'est-à-dire à la tension maximum E_0 . Une batterie d'accumulateurs pourra également être chargée par le courant redressé si, comme pour les courants alternatifs redressés, la force électromotrice à fin de charge est inférieure à E_0 .

3. Les courants de H. F. R. peuvent exciter un tube à rayons X.

Les rayons X étant produits par le passage, dans un tube à rayons X (ampoule à gaz ou ampoule Coolidge) d'un courant à haute tension et de sens constant, il est normal a priori que les courants de H. F. R., à *haute tension*, produisent ce phénomène.

Il est toutefois nécessaire que le courant ait une tension élevée, de plusieurs milliers de volts, et soit obtenu par suite à l'aide d'un appareil à bobine, ou à l'aide d'un appareil diathermique à éclateur fournissant une forte

tension, ou encore à l'aide d'un système oscillateur à lampe de grande puissance et en utilisant en plus des phénomènes de résonance pour élever la tension.

Les appareils diathermiques à lampe ne fournissent pas en général une tension assez élevée pour produire une excitation nette des tubes à rayons X.

4. Les courants de H. F. R. agissent sur les galvanomètres polarisés.

Les électromètres du *premier degré* (fournissant des mesures d'intensité et non de carré d'intensité, ou des mesures de tension), *gradués en courant continu*, sont influencés par les courants de H. F. R. en raison de la polarité de ces derniers.

Ces courants agissent donc sur les ampèremètres à aimant mobile : boussole des tangentes (galvanomètre de Pouillet), galvanomètre de Thomson ; sur les galvanomètres à cadre mobile : galvanomètre de Deprez-d'Arsonval ou appareils industriels polarisés (Chauvin et Arnoux par exemple) ; et sur les voltmètres électrostatiques ordinaires.

Cette propriété importante présentée par les courants de H. F. R. fournit un mode de mesure précieux de ces courants. Nous verrons d'ailleurs dans le chapitre suivant ce qu'il faut penser exactement des indications fournies par ces appareils et de celles que l'on obtient avec les appareils de mesure du deuxième degré : appareils électrodynamiques, électromagnétiques et thermiques, qui donnent des déviations proportionnelles au carré de l'intensité.

CHAPITRE V

Mesure des courants de haute fréquence redressés.

Un courant de haute fréquence redressé sera caractérisé d'une manière *qualitative* par la nature des oscillations constitutives : amorties, non amorties ou entretenues, et par le rapport des temps d'oscillation et de silence.

Nous avons signalé en effet, au début de ce travail, que le terme de courants de haute fréquence englobait des modalités très diverses de ces courants, s'étageant depuis les courants à ondes amorties du dispositif type d'Arsonval jusqu'aux ondes parfaitement entretenues et régulières des postes émetteurs de T. S. F. Cette détermination qualitative des courants de haute fréquence redressés n'est pas suffisante. Il faut préciser autant que possible la valeur de trois éléments présentés par ces courants : la fréquence, le voltage et l'intensité.

La détermination *quantitative* de ces courants se fait donc par la mesure de ces trois éléments.

Les difficultés éprouvées dans ces mesures sont inégales. Nous verrons qu'il est facile de *mesurer*, et non de calculer, avec précision et simplicité la fréquence ou mieux la longueur d'onde des oscillations du courant de haute fréquence ; il est plus difficile de mesurer la tension et il devient très difficile de procéder à la mesure de l'intensité des courants de H. F. R. La précision obtenue dans la mesure de ces trois facteurs est elle aussi différente. S'il est possible de connaître exactement et facilement la fréquence d'un courant de haute fréquence, grâce à un ondemètre, ce qui donne la fréquence du courant redressé, il est encore possible de connaître grâce à un spintermètre la valeur de la tension avec une précision satisfaisante ; mais il devient très difficile, voire même impossible de mesurer avec exactitude la valeur de l'intensité des courants de haute fréquence redressés. On retrouve là les mêmes obstacles que lors de la mesure des trois mêmes facteurs du courant de haute fréquence.

A. MESURE DE LA FREQUENCE

Cette mesure est expérimentalement facile pour les postes oscillants à ondes entretenues, elle ne peut se déduire que du calcul pour les postes à ondes amorties.

De toute façon, de la formule de Thomson

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

il semble aisé de tirer la valeur de la période du courant de haute fréquence dont dérive le courant de H. F. R. considéré.

Or, il est très difficile, et même impossible, de mesurer la valeur du coefficient de self induction L et de la capacité C du circuit oscillant.

Le coefficient L tiré des formules classiques suppose qu'elles s'appliquent à des bobines infiniment longues, et dans leur établissement on néglige l'action perturbatrice des pôles de la bobine. De plus, le fait de coupler la bobine oscillante avec un circuit capteur (et même le simple couplage des bobines oscillantes de grille et de plaque pour des appareils à lampe) modifie la valeur de ce coefficient L si bien qu'il ne faut attacher à sa valeur *calculée* qu'une confiance toute relative. La capacité C du condensateur variable peut être trouvée plus facilement, mais la valeur en étant variable avec chaque fréquence, il y a là autant de calculs à faire.

D'ailleurs la mesure de C déjà délicate pour des condensateurs de dimensions finies à épaisseur de diélectrique non rigoureusement uniforme, varierait selon la durée de l'expérience. A. Broca et Turchini estiment en effet que pour des fréquences de 100.000 à 3.000.000 par seconde, il faut, pour des condensateurs à lames de verre, prendre, pour valeur de C, la moitié de la valeur trouvée si l'on opère avec une durée de charge de $1/10^e$ de seconde.

C'est pour ces raisons que, lorsqu'il s'agit d'ondes entretenues, on abandonne le *calcul* de ces deux coefficients pour avoir recours à leur *mesure* expérimentale directe, infiniment plus simple et plus précise.

On utilise un *ondemètre à absorption* dont le principe repose sur des phénomènes de résonance de deux circuits oscillants.

Nous rappellerons simplement qu'un ondemètre comprend essentiellement un circuit oscillant self-capacité que l'on couple avec le circuit oscillant étudié. Deux méthodes peuvent être employées pour déceler la résonance des deux circuits. La première méthode consiste à observer la *perte d'énergie maxima* éprouvée par l'ondemètre. Il suffit de coupler cet appareil avec le circuit oscillant étudié. Au moment de la résonance, il y aura décrochement des lampes oscillatrices du poste, qui se traduira par un léger « *toc* » audible avec un casque de T. S. F. C'est là une méthode qui ne peut guère s'employer qu'avec de faibles postes, et dont on peut se dispenser le plus souvent.

La deuxième méthode consiste, au contraire, à observer *l'énergie maxima absorbée* dans le circuit de l'ondemètre. L'ondemètre du général Ferrié et l'ondemètre de Tissot en représentent la réalisation. Nous avons utilisé le deuxième, nous signalerons rapidement son principe.

Le circuit de l'ondemètre comprend une self fixe et un condensateur variable dont la modification conduit à la résonance des deux circuits ; celle-ci est atteinte lorsqu'une petite ampoule électrique en série dans le circuit s'allume (ce qui est une indication d'intensité) ; la

lampe peut être remplacée par un galvanomètre sensible dont la déviation devient maxima au moment de la résonance.

Un ondemètre bien construit, de caractéristiques physiques fixes, étalonné auprès d'un ondemètre étalon ou d'un poste officiel de T.S.F., permet d'obtenir une valeur très précise de la longueur d'onde, donc de la fréquence, du courant de haute fréquence.

La fréquence du courant de haute fréquence étant connue, il suffit pour connaître celle du courant de H. F. R. qui en dérive, de considérer le mode de redressement de ce dernier.

S'il s'agit de la suppression simple d'une alternance, la fréquence du courant de H. F. R. sera la même que celle indiquée par l'ondemètre.

S'il s'agit d'un courant véritablement redressé, avec utilisation des deux alternances, la fréquence du courant de H. F. R. sera le double de celle qui sera déduite des renseignements fournis de l'ondemètre.

B. MESURE DE LA TENSION

La tension des courants de haute fréquence fournis par les divers procédés signalés précédemment, fournit déjà un ordre de grandeur sur celle du courant redressé.

Dans tous les types d'appareils, la longueur d'étincelle obtenue en court circuit entre deux pièces métalliques branchées aux extrémités de la bobine oscillante ou entre les fils du circuit d'utilisation, permet d'estimer approxi-

mativement la valeur de la tension du courant de haute fréquence. Il suffirait d'avoir un spintermètre convenablement étalonné pour connaître cette valeur, mais il faudrait encore tenir compte des pertes de tension éprouvées lors du redressement de ces courants.

Avec un circuit oscillant à lampe (appareil diathermique au poste de T. S. F.), la connaissance de la tension plaque est utile, elle est facilement obtenue, approximativement, avec un voltmètre thermique ou électromagnétique pouvant supporter plusieurs centaines de volts.

Mais il est impossible de connaître exactement la valeur de la tension du courant haute fréquence soit par insuffisance des voltmètres, soit par baisse de tension due aux diverses pertes qui se produisent dans le condensateur, dans les conducteurs ou au niveau de tous les contacts, ou par effet Joule. Il est à plus forte raison impossible d'en déduire la tension du courant de H. F. R.

La mesure directe de la tension du courant redressé est elle aussi difficile à effectuer.

Pour mesurer la tension d'un courant de haute fréquence redressé, on peut avoir recours à un voltmètre, à un spintermètre micrométrique ou à un oscillographe.

a. LA MESURE DE LA TENSION A L'AIDE D'UN VOLTMÈTRE monté en dérivation entre les électrodes (branché aux bornes d'utilisation du redresseur) donne une précision satisfaisante pour les besoins courants.

Qu'il s'agisse d'un voltmètre électrostatique ou électromagnétique, il suffit de lire le chiffre indiqué par l'appareil. Cependant si le voltmètre n'est prévu que pour

une différence de potentiel inférieure à celle que l'on veut mesurer, il faudra mettre en série avec lui une résistance dépourvue de self et de capacité (résistance hydraulique), ainsi que nous le signalerons plus loin dans l'étude de l'influence de la tension, et d'en tenir compte dans le calcul de la tension appliquée.

La mesure de la tension avec un voltmètre polarisé donne une précision suffisante, elle est simple et ce mode de mesure peut être conservé pour les usages courants.

b. MESURE DE LA TENSION A L'AIDE D'UN SPINTERMÈTRE MICROMÉTRIQUE. Ce mode de mesure est plus précis que le précédent. On monte en dérivation sur les bornes d'utilisation du courant de H. F. R., un spintermètre micrométrique, en l'espèce un *palmer* qui répond parfaitement au but poursuivi. L'une des deux pointes étant naturellement fixe, on déplace progressivement l'autre jusqu'à ce qu'une étincelle jaillisse entre elles. Lors de la production de l'étincelle, la différence de potentiel entre les pointes du palmer est juste suffisante pour que le courant passe entre elles, et indique le voltage du courant. Il est évidemment nécessaire d'étalonner au préalable le spintermètre avec des courants de voltages connus, mais c'est là une opération simple et qui est faite une fois pour toutes.

La mesure d'une tension se ramène alors à une simple lecture opérée sur le palmer, comme lors de la mesure d'une épaisseur.

On peut également utiliser un spintermètre dont les extrémités sont constituées par deux petites sphères mé-

talliques de 10 millimètres de diamètre qu'on éloignera l'une de l'autre jusqu'à obtenir l'étincelle maxima ; il sera possible d'étalonner cet appareil ou de se reporter à des tables telles que celles de Mascart et Joubert (établies pour les tensions des courants de haute fréquence fournis par les machines statiques) pour obtenir le voltage en volts.

Ce procédé est simple, précis, s'appliquant avec prédilection aux courants des appareils type d'Arsonval, ou diathermiques à éclateur, fournissant une tension de plusieurs milliers de volts et donnant en court-circuit des étincelles de plusieurs millimètres. S'il s'agit d'un courant fourni par un poste diathermique à lampe ou d'une poste de T. S. F., la mesure de la tension par ce procédé est moins aisée car les étincelles sont moins longues le voltage étant plus faible. Les étincelles ont une longueur de 1 millimètre environ, ou même moins, pour des postes à lampe de 300 watts, et la longueur de l'étincelle peut devenir difficilement appréciable. Il est préférable, par suite, d'utiliser simplement un voltmètre polarisé auquel il sera adjoint une résistance sans self, si le besoin s'en fait sentir, en raison de la graduation de l'appareil.

C. MESURE DE LA TENSION PAR L'OSCILLOGRAPHIE. C'est là un procédé précis permettant seul de connaître la tension à un moment donné, mais qui malheureusement n'est pas applicable à la pratique médicale. Un oscillographe à inertie faible, tel l'oscillographe de Blondel, ou sans inertie, tel l'oscillographe cathodique de Dufour,

sont parfaitement utilisables pour ce genre de mesure. Nous avons utilisé seulement ce dernier appareil au cours de l'étude oscillographique mentionnée plus haut. Lors de l'inscription des courbes de tension, la déviation de la tache cathodique est proportionnelle à la valeur du champ magnétique (obtenu par le condensateur déviateur dont les armatures sont reliées au courant étudié). La déviation produite par ce champ dépend des caractéristiques du condensateur, qui sont telles qu'en général une déviation de 1 millimètre correspond à une différence de potentiel de 10 volts.

Il suffit donc de mesurer après développement du film, la hauteur de la déviation pour obtenir la valeur de la tension maxima aux bornes de l'oscillographe. Si le circuit est fermé par un shunt, aux extrémités duquel se trouve en dérivation l'oscillographe, on obtient par la mesure de la déviation de la tache cathodique, la tension aux bornes du shunt. Si le circuit réalise la disposition indiquée plus haut (ch. III, § 2, fig. 19), on peut obtenir la tension maxima du courant aux bornes du redresseur, comme nous l'avons indiqué à cet endroit. Les valeurs ainsi obtenues peuvent être considérées comme à peu près exactes, mais elles nécessitent l'emploi d'un oscillographe au maniement délicat ; elle peut toutefois servir à l'étalonnage d'appareils de H. F. R.

Somme toute, les modes de mesure de la tension en haute fréquence redressée sont peu nombreux, certains sont peu précis. En pratique pour des courants à tension, relativement élevée, on utilisera le spintermètre micrométrique, et pour des courants à tension plus faible.

on aura recours aux voltmètres polarisés, (utilisés seuls ou mis en série avec des résistances sans self).

C. MESURE DE L'INTENSITE

La difficulté de la mesure précise des intensités des courants de haute fréquence est actuellement bien connue ; pour tout dire il est pratiquement impossible d'obtenir une valeur exacte de l'intensité efficace de ces courants, pour plusieurs raisons que nous rappellerons plus loin.

Bergonié exprimait déjà en 1908, dans son rapport au Congrès de Clermont-Ferrand cette lacune dans l'emploi médical des courants de haute fréquence : « Or, tandis que les électriciens industriels ont tiré de l'électricité physique des méthodes et des appareils de mesure qui semblent leur donner toute satisfaction, les médecins, au contraire, ont été moins heureux sous ce rapport. En particulier, pour les courants de haute fréquence qui, depuis les travaux de d'Arsonval, sont de plus en plus utilisés avec succès en thérapeutique, et avec des puissances croissantes, il n'y a rien, ou à peu près rien, ni comme méthodes de mesure, ni comme instruments pouvant être utilisés dans ces applications. » Walter examina récemment (1927), comme suite aux remarques qu'il avait émises à la suite du rapport de M. Duhem (« Les applications médicales de la diathermie », 1926), les causes principales de l'inexactitude des mesures de l'intensité en haute fréquence ; nous les rappellerons très brièvement.

**Causes principales de l'inexactitude des mesures
de l'intensité.**

1. *Les capacités de spire à spire* de tout enroulement ou de toute pièce métallique dérivent parfois une partie très importante de l'intensité, d'autant plus grande que la fréquence est plus grande. L'intensité indiquée par l'appareil est plus faible que l'intensité réelle ; on dit que l'ampéremètre « *retarde* ».

Or la fréquence ne peut pas être fixe puisqu'elle dépend de la valeur de la self du circuit oscillant et des selfs et capacités parasites (boucle des conducteurs, capacité des électrodes et du sujet).

La présence d'ondes harmoniques, surtout s'il y a résonance modifie encore la fréquence.

2. *La fréquence influe sur la résistance apparente d'un galvanomètre thermique.* On sait d'après la théorie de lord Kelvin, qu'un courant de haute fréquence pénètre d'autant moins dans un fil conducteur, que sa fréquence est plus grande ; par suite, la résistance augmente et pour un galvanomètre thermique, l'échauffement du fil en est accru d'autant. L'appareil « *avance* » par rapport à ses indications fournies avec un courant continu d'intensité égale.

Cependant pour A. Broca et Turchini, considérant des fils conducteurs de cuivre, fer et maillechort, il n'en serait pas rigoureusement ainsi pour des fréquences de 190.000 à 3.000.000 par seconde.

Le rapport $\frac{R_F}{R_c}$ (résistance en haute fréquence et résistance en continu) ne serait plus égal au résultat cal-

culé d'après la théorie de Lord Kelvin ; la variation de ce rapport se ferait dans un sens ou dans l'autre, l'échauffement étant plus grand ou plus petit que celui indiqué par la théorie.

De toute façon l'échauffement du fil est atypique et le galvanomètre peut *avancer* ou *retarder*.

3. S'il s'agit d'un *ampèremètre shunté*, la self du shunt varie de ce fait même, et l'erreur croît en fonction de la fréquence. Il s'établit de plus un véritable courant dans le circuit shunt-partie active du galvanomètre qui s'ajoute au courant d'utilisation, et cette nouvelle erreur peut devenir importante en cas de résonance des deux courants.

En somme, il existe de nombreuses causes d'erreurs qui faussent la mesure des intensités en haute fréquence, et l'on doit considérer en général les résultats fournis par les appareils de mesure non comme des résultats exacts, mais comme des résultats approchés, par défaut ou par excès.

On pourra diminuer par suite l'erreur de mesure en utilisant des circuits très simples, aux pièces métalliques isolées autant que possible, en opérant avec des fréquences semblables et en mesurant les intensités avec le même appareil, étalonné pour une gamme de fréquence et non shunté si possible.

D'ailleurs tous les appareils de mesure d'intensité ne sont pas de la même valeur, les galvanomètres thermiques sont les meilleurs.

**Valeur des principaux ampèremètres utilisés
en haute fréquence.**

1. APPAREILS A CADRE MOBILE

Ils offrent une synthèse de toutes les causes d'erreur en raison de leur faible isolement de spire à spire ; ils supportent mal les tensions élevées de haute fréquence ; leur emploi doit être rejeté.

2. APPAREILS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Walter et beaucoup d'autres trouvent à ces appareils les mêmes défauts qu'aux précédents. Leurs pièces magnétiques sont de plus le siège de courants de Foucault, de sorte qu'ils donnent des mesures très erronées. Ils sont à écarter très nettement d'après cet auteur.

Nous avons été surpris pour notre part de constater que le redresseur de Cluzet et Chevallier avait été équipé par le constructeur (Gaiffe) avec un tel appareil de mesure, certain que nous étions de son incapacité à fournir des renseignements exacts. Le milliampèremètre comportait en outre un condensateur en dérivation.

Nous avons comparé ses indications avec celles d'un milliampèremètre à couple thermo-électrique, appareil auquel on accorde une bonne précision, et nous avons constaté avec non moins de surprise que, pour des courants à ondes entretenues et de faible intensité (plus petite que 50 milliampères) leurs indications concordaient sensiblement. Nous n'avons pas en effet relevé des différences de plus de 10 %. Cette erreur est évidemment impor-

tante en elle-même, elle serait énorme avec d'autres appareils, pour d'autres mesures, mais en haute fréquence il ne faut pas être trop exigeant et nous croyons que de tels appareils ne sont pas systématiquement à éliminer ; ils donnent, en tout cas, une précision suffisante pour la pratique médicale.

Cependant s'il s'agit de courants à ondes amorties, un tel appareil ne fournit aucun renseignement valable en raison de la grande durée des périodes de silence par rapport aux périodes oscillatoires.

3. APPAREILS THERMIQUES

Ce sont les plus précis, ils réalisent différents types.

Ils présentent néanmoins deux inconvénients : la déviation de l'aiguille est proportionnelle au « carré moyen » de l'intensité, de sorte que les divisions de la graduation sont trop serrées dans leur première partie, ce qui nuit à la facilité des lectures, d'une part ; et ils présentent une inertie thermique entraînant un déplacement long de l'aiguille, d'autre part.

a. Appareils à dilatation simple :

Ce sont les plus robustes, les plus employés. Ils ne présentent rien de particulier à noter.

b. Appareils à dilatation shuntés :

Ils sont moins exacts que les précédents et ne fonctionnent bien que pour des courants à fréquence prévue lors de la construction et de l'étalonnage de l'appareil.

c. *Appareils à couple thermo-électrique.*

Ce sont eux qui donnent le plus de précision, car ils éliminent la plupart des causes d'erreurs. Cependant leur défaut important est encore représenté par l'inertie calorifique.

Nous avons vérifié les indications d'un milliampère-mètre électromagnétique avec un ampèremètre à couple thermo-électrique *dans le vide*, construit par la Maison Chauvin et Arnoux.

Son principe en est très simple : un fil chauffant reçoit à sa partie médiane la pointe d'un petit couple thermo-électrique relié à un galvanomètre à équipage mobile, type Deprez-d'Arsonval. L'appareil est placé loin de la source de haute fréquence redressée (*cinq ou six mètres*), en dérivation sur les électrodes.

Cet appareil présente le gros inconvénient d'une graduation très serrée à son début ne permettant une lecture facile qu'à partir de 2 milliampères. Il peut mesurer, s'il est convenablement shunté par des résistances sans self, une intensité de un ampère (le shunt fourni par le constructeur présente des selfs et devient par suite inutilisable).

Il faut, au cours des mesures de l'intensité des courants de haute fréquence redressés, tenir compte de la propagation de la haute fréquence. Prenons un exemple. Soit un poste diathermique fonctionnant, relié à un redresseur éteint. La haute fréquence ne doit pas théoriquement franchir ce dernier. Or nous avons constaté que si l'on branche le milliampèremètre thermique sur le redresseur (ne fonctionnant pas), l'appareil de mesure

indique une certaine intensité due à la propagation de la haute fréquence, grâce aux pièces métalliques de tous les appareils. C'est ainsi, pour fixer les idées, qu'avec un courant grille de 40 milliampères (poste de T. S. F.) l'intensité de la haute fréquence ayant atteint le milli-ampèremètre thermique, à travers le redresseur éteint, était de 7 milliampères.

Il faut tenir compte de ce fait qui, s'il était négligé, donnerait une valeur de l'intensité du courant redressé entièrement inexacte. Il faut donc, lorsqu'on se sert d'un appareil thermique, mesurer au préalable l'intensité du courant de haute fréquence qui franchit le redresseur, afin d'en tenir compte dans l'évaluation de l'intensité du courant de H. F. redressé.

C'est là, à notre avis, un inconvénient sérieux que ne présente pas évidemment un appareil électro-magnétique (non influencé par un courant de haute fréquence non redressé). Ces diverses considérations font que l'on peut admettre, pour des usages cliniques qui n'exigent pas une exactitude rigoureuse, un appareil électro-magnétique.

d. *Appareils photométriques.*

Leur rôle d'appareil de mesure repose sur l'appréciation de l'éclairement d'un fil porté au rouge par le courant.

e. *Bolomètres :*

Il s'agit de mesurer l'échauffement d'un fil par les modifications de sa résistance ohmique sous l'influence du courant qui le traverse.

Ces deux derniers procédés sont précis, mais leur emploi reste localisé à des usages de laboratoire.

4. L'EFFET ÉLECTROLYTIQUE

Cet effet peut être utilisé pour la mesure de l'intensité et de la quantité d'électricité des courants de haute fréquence redressés. C'est un procédé précis qui élimine l'influence de la propagation de la haute fréquence, contrairement aux appareils thermiques.

Le principe des mesures par cette méthode est identique à celui de la mesure électrolytique du courant galvanique. Les lois de Faraday sont applicables aux courants de H. F. R.

Les mesures seront faites soit avec un voltamètre ordinaire avec une solution d'acide sulfurique, ou avec un voltamètre de Bertin, de Renard, soit avec un coulombmètre de GaiFFE, comme s'il s'agissait d'un courant galvanique, ainsi que nous l'avons rappelé plus haut.

C'est là malheureusement une méthode peu rapide, mais qui peut servir, une fois pour toutes, à un étalonnage satisfaisant d'un milliampèremètre électro-magnétique.

En somme, il est possible de mesurer l'intensité des courants de haute fréquence redressés soit avec un milliampèremètre électro-magnétique (étalonné pour des fréquences données, et non shunté de préférence), ou des milliampèremètres thermiques, à fil dilatable ou à couple thermo-électrique, soit par la méthode électrolytique, selon les procédés classiques.

L'usage des milliampèremètres, électromagnétiques ou thermiques, peut être considéré comme suffisant pour des usages médicaux, mais l'exactitude peut théoriquement être seule atteinte par la méthode électrolytique. Ce dernier procédé est long, délicat, nécessitant, pour des mesures précises, des corrections de température et de pression, ce qui en interdit l'usage pratique et en fait un procédé de laboratoire.

Deuxième Partie

**ÉTUDE PHYSIOLOGIQUE DES COURANTS
DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS**

EFFET PHYSIOLOGIQUE CARACTÉRISTIQUE DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS

CONDITIONS D'EXPÉRIMENTATION

En 1925, MM. Cluzet et Chevallier signalaient les premiers, à la Société de Biologie, qu'un courant de haute fréquence, transformé et rendu de sens constant, était capable de produire des phénomènes d'excitation motrice neuro-musculaire.

La modification du courant était produite par le système redresseur de ces auteurs, dont nous avons indiqué la constitution dans un chapitre précédent. Le courant de haute fréquence étudié était fourni soit par un appareil à bobine du type d'Arsonval (à ondes amorties), soit par un appareil diathermique à transformateur magnétique, à circuit fermé et à éclateur (à ondes non amorties). Dans les deux cas, le courant de haute fréquence, après la traversée du redresseur, était capable de produire des effets d'excitation des nerfs ou des muscles.

Dès leur première communication, MM. Cluzet et Chevallier envisageaient déjà le rôle probable de la tension

dans ces phénomènes d'excitation, les mêmes effets étant obtenus avec des intensités faibles et une forte tension (appareil à bobine) ou par des intensités plus fortes et une tension plus faible (appareil diathermique à éclateur).

Ces auteurs signalaient également un caractère frappant observé dans l'excitation par ces courants ; la facilité d'apparition et de maintien de la téτανisation (10 minutes), sans phénomènes douloureux.

Telle est la caractéristique physiologique essentielle de ces courants : action motrice marquée donnant facilement la téτανisation musculaire, ne s'accompagnant pas de sensation douloureuse.

Ces phénomènes se retrouvent également si le courant de haute fréquence est fourni par un poste diathermique à lampe. Dans ce cas, les ondes, bien qu'elles soient dites « *ondes entretenues* », n'ont pas la même amplitude, puisque leur ensemble (ainsi que l'a confirmé l'étude oscillographique) admet une enveloppante ayant en première approximation une forme sinusoïdale (forme due au courant alternatif alimentant le poste diathermique). De plus les périodes de silence ne sont pas supprimées. Si le courant d'alimentation est à 50 périodes, la durée de chaque train d'onde est de 1/100 seconde (en réalité cette durée est un peu plus grande en raison de l'étalement léger de la zone d'oscillations, dû à la self et aux capacités des circuits du poste), tandis que celle des périodes de silence est, elle aussi, de 1/100 seconde (un peu plus petite que 1/100 sec. pour les mêmes raisons). L'étude oscillographique nous a montré qu'un courant de haute fréquence redressé, obtenu à partir d'un tel

poste, est formé de trains d'ondes indirectionnels (formant une série discontinue d'ondes de basse fréquence) composé chacun d'un grand nombre d'ondes élémentaires de haute fréquence.

Même dans les postes diathermiques à deux lampes montées en opposition (supprimant les périodes de silence), les ondes de haute fréquence n'ont pas constamment la même hauteur, celle-ci variant suivant une courbe ayant l'aspect de deux demi-sinusoïdes juxtaposées, en raison du courant alternatif d'alimentation.

On pouvait, en outre, se demander si les actions excito-motrices observées avec les courants de haute fréquence redressés étaient dues au courant de basse fréquence formé par la succession des trains d'ondes, plutôt qu'aux ondes élémentaires de haute fréquence contenues dans ces trains.

Ces 3 considérations : présence des intervalles de silence, inégalité de hauteur des ondes élémentaires de haute fréquence, possibilité d'action du courant de basse fréquence formé par la succession des trains d'ondes, conduisirent M. le Professeur Cluzet à nous conseiller d'utiliser, pour l'étude quantitative de ces courants, une source d'ondes entretenues.

Tous les résultats expérimentaux que nous fournissons furent obtenus avec un poste émetteur de T.S.F.

La propriété physiologique la plus importante de ces courants, et qui les caractérise dans ce domaine, est bien leur pouvoir excito-moteur. Très loin derrière cette action se placent d'autres rôles : sensitif, vaso-moteur et calorifique, infiniment moins marqués.

Peut-on être surpris de l'action excito-motrice de ces courants de haute fréquence redressés ? A priori peut-être en raison de leur dénomination. On sait, en effet que les courants de haute fréquence n'ont pas la propriété d'exciter les muscles ou les nerfs ; or, dans la désignation du courant que nous étudions, entre l'expression « *haute fréquence* », si bien que ce rapprochement : haute fréquence et excitation motrice, semble choquant. En réalité, les ondes de haute fréquence génératrices du courant excito-moteur sont polarisées par les valves thermo-ioniques, et les demi-ondes élémentaires du courant redressé ne sont plus qu'un véritable support d'une électricité de même signe, éminemment apte à produire l'excitation neuro-musculaire. Il s'agit simplement d'une excitation par des « *ondes polarisées* » ou mieux par des « *demi-ondes polarisées* » à haute fréquence, relevant de la théorie de Nernst sur la cause de l'excitation des tissus.

CHAPITRE PREMIER

Effets sensitifs, vaso-moteur et calorifique, des courants de haute fréquence redressés.

A. EFFETS SENSITIFS

Pour leur étude, le dispositif est le même que pour celle des effets moteurs. Nous avons utilisé la méthode unipolaire d'excitation. L'électrode indifférente était placée sur la face antérieure de l'avant-bras, tandis que l'électrode active était disposée soit sur le trajet du nerf médian au poignet, soit sur les muscles de l'éminence thénar. Les électrodes revêtaient le type habituel utilisé pour l'électrodiagnostic : électrodes spongieuses imbibées d'eau.

Les effets sensitifs se produisent avec des intensités différentes suivant la valeur de la tension appliquée au sujet. Quoi qu'il en soit, ils restent qualitativement les

mêmes, quelle que soit l'intensité qui provoque leur apparition. Ces effets sont surtout marqués lorsque l'électrode active est sus-jacente au trajet du nerf mixte considéré (médian au poignet). Avec une intensité qui varie de 1 à 2 ou 3 milliampères, le sujet éprouve, dans le territoire nerveux correspondant, une sensation de fourmillement analogue à celle produite par le courant faradique et qui croît à mesure qu'augmente l'intensité du courant. Cette sensation est différente de celle que produit le courant galvanique ; le picotement fourni par le courant de haute fréquence redressé est plus fourni mais moins intense que celui produit par le courant galvanique.

Lorsque survient la téτανisation musculaire (entre 5 et 6 milliampères environ par des ondes à tension relativement basse), la sensation change. Le sujet n'éprouve plus de fourmillement comme précédemment, mais il a l'impression de ressentir véritablement la téτανisation ; il sent ses muscles se contracter violemment, un peu comme dans une contraction volontaire énergique ; mais, et c'est là un point à noter, il n'éprouve jamais de douleur, ou de sensation de brûlure.

Si la tension appliquée augmente notablement et si elle dépasse 5.000 ou 6.000 volts avec une intensité forte dépassant environ 15 milliampères, le sujet éprouve, alors que la téτανisation est véritablement considérable, une sensation qui se rapproche de celle fournie lors d'une excitation forte par le courant galvano-faradique.

Puis si la tension et l'intensité du courant appliqué croissent encore, la téτανisation devient très pénible, et même insupportable, tant elle est violente et tant la sen-

sation précédente devient accusée. En pratique on n'a pas d'ailleurs à atteindre de telles tétanisations correspondant à 8 ou 10.000 volts et 20 milliampères environ, l'excitation devant se faire normalement avec quelques centaines de volts et une intensité inférieure à 5 milliampères.

Si l'électrode active est située sur le muscle, les effets sensitifs sont identiques mais moins marqués.

En tout cas, il est intéressant de noter que l'on n'éprouve jamais, même avec de fortes tensions et de grandes intensités, une sensation de brûlure sous les électrodes, ou loin des électrodes, comme avec le courant galvanique au-delà de 10 milliampères environ. Nous n'avons pas remarqué de différences bien sensibles entre les actions sensitives fournies par l'électrode active suivant son signe. Il nous semble cependant que les sensations sont plus accusées avec le pôle négatif qu'avec le pôle positif.

Les actions sensitives des courants de haute fréquence redressés sont dues probablement à un ensemble de deux causes :

La polarisation de ces courants les rend aptes à produire l'électrolyse des tissus, tout comme le courant galvanique, ce qui donnerait lieu à une sensation parfois pénible due à une désorganisation plus ou moins marquée des tissus, constatée d'ailleurs histologiquement par Weiss pour le courant galvanique de forte intensité.

— L'action élective sur les nerfs doit également entrer en jeu. On sait que les effets sensitifs du courant faradique (incapable de produire l'électrolyse) sont expliqués par un effet sélectif sur les nerfs, et il est probable que

cette action élective constitue une propriété de ces courants.

On peut expliquer, par l'intervention isolée ou par la combinaison de ces deux facteurs, les effets sensitifs variables provoqués par les courants de H. F. redressés. A faible tension et faible intensité, seule l'action élective sur le nerf pourrait agir ou tout au moins serait prédominante et donnerait, comme pour le courant faradique, une sensation de fourmillement, tandis qu'à plus haute tension et plus forte intensité, les deux actions se combineraient pour donner une sensation forte, voire même très marquée, analogue à celle produite par le courant galvano-faradique.

B. EFFETS VASO-MOTEURS

On constate, dans les régions polaires, lorsque le passage du courant a été prolongé, des phénomènes vaso-moteurs, d'ailleurs modérés. Au niveau des deux pôles apparaît une vaso-dilatation nette, sans prédominance marquée pour l'un des deux pôles.

Nous ne pouvons dire avec certitude si le courant de H. F. R. possède des propriétés résolutes au pôle négatif, comme le courant galvanique, ainsi que l'avait observé Tripier avant que Leduc n'ait décrit ce phénomène sous le nom de « *sclérolyse* ».

Cette action peut s'expliquer comme pour le courant galvanique, d'après Courtade, soit par excitation immédiate des filets sympathiques péri-vasculaires, soit par

excitation réflexe, par irritation des nerfs sensitifs allant influencer les centres et réagissant eux-mêmes sur les vaisseaux par voie sympathique.

C. EFFETS CALORIFIQUES

Théoriquement, les courants de haute fréquence redressés sont capables de produire dans l'organisme vivant, qui n'est pas doué d'une grande conductibilité électrique, des actions thermiques.

Ces actions thermiques seraient dues au passage du courant dans le corps, jouant le rôle d'une capacité (en dérivation sur une résistance pourvue d'une faible self-induction, elle-même en série avec une autre résistance sans self, selon le schéma classique).

Or, les courants de H. F. R. étant polarisés sont capables de produire d'autres effets que des actions thermiques, étant analogues en cela à un courant continu.

On sait d'ailleurs, et M. Chanoz l'écrivait dès 1910, que les actions du courant continu sur les tissus sont au nombre de cinq ; nous citerons cet auteur : « l'électricité agissant sur les tissus, sous la forme très simple et facile à étudier de courant continu, produit les cinq actions suivantes actuellement connues :

1° Une action calorifique inévitable (effet Joule).

2° Des actions chimiques aux contacts divers : liquide | liquide, membrane | liquide.

3° Des variations de la concentration « globale »-des ions aux mêmes points.

4° Le phénomène d'osmose électrique (anaphorèse et cataphorèse) au niveau des membranes organiques et des cellules.

5° Et très probablement une orientation et une distribution particulière du protoplasma cellulaire. »

Il en résulte donc que l'action thermique d'un courant polarisé est inséparable des processus modificateurs des tissus, et par suite est inutilisable comme source thermogène en raison des modifications tissulaires produites; celles-ci produisent notamment la polarisation des tissus et comme conséquence des phénomènes sensitifs, voire douloureux (si la polarisation est accentuée) et surtout des phénomènes d'excitation neuro-musculaire qui prennent rapidement le pas sur les phénomènes thermiques. Il en résulte que l'action thermique des courants de haute fréquence redressés n'est pas applicable comme celle des courants diathermiques dont ils peuvent dériver, à la production intense de chaleur au sein des tissus.

C'est ce que l'expérience nous a d'ailleurs montré; en appliquant les mains sur deux larges électrodes métalliques où arrive un courant de H. F. R. de faible intensité (4 ou 5 milliampères), nous n'avons pas éprouvé de sensation de chaleur alors que des contractions diffuses des muscles s'observaient et que nous éprouvions la sensation du passage du courant dans les membres supérieurs. Remarquons qu'avec cette intensité faible, il y eut production abondante de sueur au niveau des deux mains, comme s'il y avait là un véritable équivalent mineur de l'effet diathermique.

L'action calorifique d'un courant de haute fréquence redressé peut être utilisé pour produire l'ÉLECTRO-COAGU-

LATION DES TISSUS. Nous avons produit la destruction complète de fragments de viande de boucherie, en utilisant le dispositif classique de l'électrocoagulation. Nous signalons ce fait simplement pour mémoire, car il n'existe a priori aucun avantage à préférer ces courants à ceux de haute fréquence pour produire l'électro-coagulation des tissus.

Ces trois actions : sensitive, vaso-motrice et calorifique des courants de haute fréquence redressés existent bien, mais sont relativement peu importantes par rapport à leur action physiologique essentielle, caractéristique, qui est leur pouvoir excitant des nerfs et des muscles.

CHAPITRE II

Etude des effets moteurs des Courants de Haute Fréquence redressés

§ I. ETUDE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE ISOTONIQUE

Nous avons étudié les courbes de contraction musculaire du gastrocnémien de grenouille et des muscles de l'éminence thénar de l'homme. Dans les deux cas, nous avons employé la méthode de contraction isotonique. Toutes les courbes furent prises selon la technique habituelle, mais en utilisant non un cylindre de Marey horizontal mais un cylindre américain de grand axe vertical, pouvant donner par un jeu d'ailettes, huit vitesses différentes. L'inscription fut faite par un long stylet souple de 12 centimètres de long, tangent à une génératrice du cylindre. Nous n'avons pu employer l'inscription fron-

tale en raison de l'amplitude très marquée de contractions qui ne put s'allier à la solidité du stylet inscripteur. Les courbes que nous reproduirons plus loin sont des réductions des $\frac{2}{3}$ environ des tracés originaux et présentent une déformation qui semble peu marquée par rapport aux tracés exacts qu'aurait fourni l'inscription frontale. L'inscription du temps se fait à l'aide d'un diapason électrique donnant 100 vibrations doubles à la seconde. Un signal de Marcel Déprez indique la durée du passage du courant.

Nous avons pris chez la grenouille et chez l'homme, 3 variétés de courbes isotoniques : des courbes de contraction isolée produites avec un temps de passage relativement court (6 ou 7 centièmes de seconde), des courbes de contraction isotonique avec temps de passage long (de 20 secondes à 4 minutes), donnant au maximum la « *tétanisation* » et des courbes de tétanos physiologique obtenues par répétition des trains des excitatrices.

A. Courbes de contraction isotonique obtenues chez la grenouille.

Nous avons monté la préparation suivant la technique classique : la grenouille ayant le bulbe détruit est fixée par les pattes, le ventre contre la planchette ; le gastrocnémien dénudé est sectionné au-dessous de son sésamoïde et accroché à une aiguille, reliée par un fil, au stylet inscripteur. Le nerf sciatique est isolé à la partie postéro-interne de la cuisse et chargé sur les électrodes impolarisables de Lapique ou de d'Arsonval dont le sépare un tampon d'ouate imbibé de sérum physiologique. Le sens

du courant excitateur est descendant. Le courant de haute fréquence redressé est envoyé simultanément dans la préparation et dans le signal de Deprez par l'intermédiaire d'une clef de Courtade dont les deux branches sont solidaires l'une de l'autre.

1. ETUDE DE LA CONTRACTION SIMPLE — CONTRACTION DE FERMETURE ET SECOUSSE D'OUVERTURE

Nous rapportons dans les planches I et II, deux séries de tracés qui quoique différents dans leur morphologie présentent les mêmes accidents caractéristiques. Nous nous sommes placés au-dessus du seuil de façon à enregistrer à la fois les contractions élémentaires de fermeture et d'ouverture. Nous indiquons en légende les valeurs de l'intensité, de la tension et de la longueur d'ondes avec lesquelles nous avons opéré.

On voit en examinant l'une quelconque des courbes, qu'elles présentent :

1. UN TEMPS DE LATENCE court, égal à 1/100 seconde environ.

2. Une CONTRACTION DE FERMETURE, ample, donnant une pointe aiguë sur le tracé.

3. Une SECOUSSE D'OUVERTURE qui, sur les tracés reproduits, est plus ample que celle de fermeture. Mais, dans plusieurs tracés, elle était plus faible que la contraction de fermeture, leur amplitude relative étant fonction de l'intensité et de la tension du courant excitateur. Les deux secousses sont immédiatement juxtaposées (d'où l'aspect d'un V à branches égales ou inégales) ou séparées par un trait horizontal (amorce de plateau), haut

situé au-dessus de la ligne de départ ; ces deux aspects des contractions sont dues à une durée plus ou moins longue du passage du courant, les autres facteurs restant les mêmes. Si le temps de passage est court (inférieur à $1/10$ de seconde), la contraction de fermeture et la secousse d'ouverture sont juxtaposées et se suivent immédiatement (cas rapportés par nos tracés) ; si le temps de passage est plus long (supérieur à $1/10$ de seconde) les deux contractions sont séparées l'une de l'autre par un petit plateau, témoin précoce de la tétanisation produite par l'excitant (tracés non reproduits).

4. LA DÉCONTRACTION N'EST PAS RAPIDE, elle persiste pendant plusieurs centièmes de seconde ; toutes les courbes présentent au début de la décontraction une nouvelle élévation, témoignant d'une véritable *contracture* du muscle, suffisante pour vaincre l'inertie du système inscripteur.

La durée totale de la contraction est environ de $1/10$ de seconde.

Ces tracés de contraction simple mettent en évidence deux caractères importants : la *présence d'un plateau* et l'existence d'une *décontraction lente*.

L'existence d'un plateau entre les tracés des contractions de fermeture et d'ouverture, pour des durées de passage du courant supérieures à $1/10$ de secondes environ, montre bien la tendance tétanisante de la contraction musculaire.

La décontraction lente avec contracture serait due, si l'on adopte les idées de Lapicque sur la pathogénie de la contracture, à la difficulté qu'éprouve le sarcoplasme

à brûler l'acide lactique produit pendant la contraction musculaire.

Lapicque a montré, en effet, que les excitations brèves et intenses peuvent altérer plus ou moins le sarcoplasme qui ne peut plus libérer la substance anisotrope de l'acide lactique qui reste fixé sur elle, si bien que la décontraction se fait mal et lentement.

C'est là un mécanisme plausible qui serait dû ici à l'action très forte exercée par les courants de haute fréquence redressés sur la fibre musculaire ; il est toutefois difficile de l'admettre sans restrictions puisque des excitations nouvelles produisent des contractions toujours semblables qui ne laissent mettre en évidence aucun signe de fatigue du muscle.

Au cours de cet exposé, nous avons employé les expressions « *contraction de fermeture* » et « *secousse d'ouverture* ». Il nous semble, en effet, que les raccourcissements du muscle au moment des périodes de fermeture et d'ouverture n'ont pas la même signification physiologique.

Si l'on admet, ce qui est logique, en raison de la très grande fréquence du courant utilisé, que la quantité d'électricité transportée par une onde élémentaire est insuffisante pour produire à elle seule une secousse musculaire, il faut admettre que le premier accident observé sur les courbes résulte de l'action de plusieurs ondes élémentaires. Donc il existe bien une véritable « *contraction* » musculaire de fermeture, résultant de l'addition de plusieurs excitants élémentaires, ainsi que nous le verrons plus loin.

Le deuxième accident observé sur les courbes résulte,

au contraire, très certainement de la dernière onde élémentaire qu'a reçue le muscle ; il s'agit alors non plus d'une contraction mais bien d'une « secousse » musculaire due à un seul agent excitant.

Il y a là une discussion un peu théorique mais parfaitement exacte si l'on rappelle simplement les distinctions nettes que font les physiologistes entre ces deux termes.

2. ETUDE D'UNE CONTRACTION PROLONGÉE. TÉTANISATION

Nous reproduisons planche III une courbe myographique du gastrocnémien de grenouille obtenue par un seul passage du courant ayant duré 20 secondes, la vitesse de rotation du cylindre étant de 1 tour en 60 secondes. Les conditions expérimentales où nous nous sommes placés sont indiquées en légende.

On voit que la courbe est constituée par une brusque ascension suivie d'un plateau dont la portion horizontale dure environ 8 secondes, puis d'une descente lente. Au bout de 20 secondes, le muscle qui vient de présenter une contraction considérable est encore loin de la fatigue puisqu'au moment de la rupture du courant, il donne une secousse d'ouverture d'une amplitude notable, après laquelle le muscle revient lentement à ses dimensions primitives.

La présence d'un plateau accentué ne baissant qu'après 8 secondes environ ; la possibilité d'obtenir une secousse d'ouverture ample après une contraction de 20 secondes, sous l'influence d'une seule excitation sont des caractères qui contribuent à individualiser fortement les

effets moteurs produits par les courants de haute fréquence redressés. De tels effets s'opposent à ceux produits par le courant faradique et le courant galvanique. La persistance de la décontraction marque une différence importante avec la téτανisation due au courant faradique. La présence d'un plateau accusé (qui manque pour des excitations courtes plus petites que 1/10 seconde), entre la contraction de fermeture et la secousse d'ouverture, montre qu'il y a une différence fondamentale avec l'effet du courant galvanique.

3. COURBES DE TÉTANOS PHYSIOLOGIQUE

Nous avons comparé les courbes de téτανos physiologique obtenues par le courant faradique (5 centimètres de distance des bobines, 30 à 40 interruptions du courant par seconde) et par le courant de H. F. redressé (Planche IV). L'interruption du courant dans ce dernier cas était produite par la simple manœuvre au doigt d'une clef de Morse ; c'est dire que le nombre d'interruptions était certainement inférieur à 10 par seconde, et cependant la courbe obtenue est celle d'un *tétanos parfait*, avec fusion complète des secousses élémentaires (bien que la durée des secousses soit environ de 1/10 de seconde environ). Ce premier caractère : apparition d'un téτανos parfait malgré une fréquence d'excitation faible est encore en faveur de la tendance téτανisante des courants de H. F. redressés.

La comparaison des deux courbes de la planche IV, obtenues par une série d'excitation pendant 2 minutes et 30 secondes, montre que la courbe de téτανos musculaire obtenue avec les excitations du courant de H. F.

redressés présente un plateau plus élevé que l'amplitude de la contraction de fermeture, comme si un plus grand nombre de fibres entraient alors en contraction, ou comme si la contraction était plus vive. Il n'en est plus de même pour le faradique, où le plateau est moins élevé que la contraction initiale.

De plus, il semble (sur les tracés originaux principalement, où la réduction ne gêne pas, comme sur les planches, pour l'appréciation des pentes), que la fatigue musculaire apparaît plus rapidement avec le courant faradique. Mais c'est là un fait secondaire auquel nous n'attachons pas une grande importance.

B. Courbes de contraction isotonique obtenues chez l'homme.

Le dispositif d'inscription était le même que précédemment. Le sujet est assis, le coude et le poignet sont relâchés et soutenus ; la main repose par sa face dorsale sur la planchette et un fil enserre la base de la phalange du pouce. Pour éviter les mouvements de trop grande amplitude du stylet inscripteur, nous avons utilisé un poids tenseur de 20 grammes plongeant dans un bain de glycérine. Pendant la contraction musculaire, le poids tenseur était par suite rigoureusement immobile, ce qui éliminait son influence perturbatrice sur l'inscription des tracés. La méthode unipolaire fut utilisée avec l'électrode indifférente sur l'avant-bras et l'électrode active sur la base des muscles de l'éminence thénar.

1° ENREGISTREMENT DES CONTRACTIONS DE FERMETURE

Nous rapportons planche V (tracé 1) l'inscription de contractions de fermetures obtenues dans les conditions rapportées plus haut. Nous avons utilisé une intensité et une tension faibles (2 milliampères — 200 volts en haute fréquence) pour éviter la téτανisation. Nous verrons en effet que la secousse d'ouverture nécessite une intensité forte, ou un temps de passage long du courant pour lesquels apparaît la téτανisation qui masque la secousse d'ouverture.

Ce tracé montre donc des contractions de fermeture isolées et il est facile de constater que les tracés présentent le même accident que pour les contractions du gastrocnémien de grenouille, c'est-à-dire une véritable contracture succédant à la phase d'énergie décroissante de la contraction.

La décontraction lente apparaît donc même chez l'homme, où un courant faible peut, à travers les téguments, retentir sur le sarcoplasme qui libère lentement les fibres musculaires de l'acide lactique produit pendant la phase d'énergie croissante.

2° ENREGISTREMENT DE LA TÉTANISATION

Nous rapportons, planche V (tracé 2), un tracé de contraction téτανisante obtenu chez l'homme avec un courant de H. F. R. doué d'une tension et d'une intensité plus grandes que dans le cas précédent (voir la légende). Le temps de passage, continu, du courant était de 4 secondes, mesuré au chronomètre et vérifié par le temps de rotation du cylindre.

On voit nettement que la contraction de fermeture est ample; elle est même constituée sur notre tracé de deux ascensions, puis qu'elle est suivie d'un plateau élevé, bien soutenu, ne s'inclinant que lentement, proportionnellement au temps de passage du courant. Il est à remarquer toutefois que la rupture du courant ne s'accompagne pas d'une secousse de fermeture, mais que la décontraction est rapide ne présentant pas ici de contraction. Quoi qu'il en soit, ce tracé met bien en évidence l'existence d'une tétanisation nette durant pendant tout le passage du courant, contrairement à ce qui se produit avec le courant galvanique.

La planche VI rapporte le tracé d'une tétanisation de durée plus longue obtenue avec les mêmes caractéristiques de courant ; le temps de passage du courant était de 30 secondes. Ce tracé montre les mêmes accidents que le précédent, offrant à l'examen une contraction de fermeture très ample qui est suivie par un plateau nettement horizontal dans son ensemble. Il est remarquable de constater le maintien de la tétanisation à une valeur très régulière, ce qui témoigne de la grande résistance des muscles à la fatigue. D'ailleurs, nous signalerons qu'un muscle peut tenir la tétanisation pendant 10 minutes environ, sans que la fatigue ne survienne de façon sensible, soit du côté du sujet, soit du côté du muscle.

Après la cessation du courant, la décontraction survient plus ou moins rapidement, sans secousse d'ouverture nette. (Nous n'avions pas une intensité suffisante pour qu'elle apparaisse). Nous appelons d'ailleurs qu'il est très difficile d'observer la secousse d'ouverture avec le pôle négatif, car elle réclame une intensité pour la-

quelle apparaît la téτανisation, et la secousse d'ouverture n'est plus apparente. Pour obtenir cette secousse, il faut des temps d'excitation très courts ne produisant qu'un début de téτανisation.

Le plateau de téτανisation n'est pas rectiligne dans certains cas, mais présente des ondulations qui ont pour cause non pas de petites oscillations du poids tenseur (qui est relativement lourd et immergé dans la glycérine) mais une téτανisation incomplète analogue au téτανos imparfait. Les fibres musculaires ne présentent pas toutes une contraction, la téτανisation est due probablement à une partie seulement des fibres qui se contractent tandis que les autres sont au repos. C'est d'ailleurs par l'existence de ces phases alternatives de contraction et de repos, que peut s'expliquer la très longue tolérance du muscle pour la téτανisation produite par ces courants.

Nous n'avons pas rapporté de courbes de téτανos proprement dit, obtenues par des excitations répétées du muscle, l'aspect de celles-ci étant celles d'un téτανos parfait classique.

En résumé, l'étude myographique des contractions musculaires produites par les courants de haute fréquence redressés, chez la grenouille et chez l'homme, montre :

1. La forte tendance téτανisante de ces courants, la téτανisation étant notamment, toutes choses égales d'ailleurs, fonction du temps et apparaissant lorsque l'excitation dépasse $1/10$ de seconde environ.

2. La lenteur de la décontraction qui oppose la contraction qu'ils produisent à celles qui sont dues au courant faradique.

3. La présence d'un plateau élevé entre la contraction de fermeture, la secousse d'ouverture, ou après la contraction de fermeture, qui l'oppose au courant galvanique.

**C. Action des courants de H. F. R. sur les organes vitaux
et sur les nerfs après la mort.**

L'étude myographique des contractions musculaires obtenues avec les courants de H. F. R. montre donc bien les caractères spéciaux de ces contractions, et met en évidence les signes distinctifs qui les opposent à celles produites par les autres formes usuelles du courant électrique.

Il était intéressant, d'autre part, de constater les effets produits par ces courants sur l'ensemble du système musculaire d'un animal et sur les organes vitaux, cœur et poumons. Nous avons répété des expériences de MM. Cluzet et Chevallier et nos conclusions furent identiques aux leurs. Nous nous permettons de rapporter intégralement un passage d'une note, que ces auteurs présentèrent en 1925 à la Société de Biologie.

« Si l'on place une électrode dans la bouche ou sur la région cervicale, et l'autre électrode sur la région lombo-sacrée, la haute fréquence redressée produit la tétanisation de tous les muscles. Chez le cobaye, la respiration est définitivement arrêtée après 1 à 2 minutes de passage du courant (0,4 milliampère à haute tension, ou 6 milliampères à basse tension) et le cœur continue à battre encore pendant quelques minutes pour s'arrêter

en diastole ; la mort par asphyxie survient dans les mêmes conditions lorsque les électrodes sont placées sur deux faces opposées du thorax et lorsque les muscles respiratoires sont, par suite, excités directement. Il est à remarquer que, pour ces mêmes intensités et aussi pour des intensités beaucoup plus fortes, la haute fréquence ordinaire, non redressée, ne produit aucun effet appréciable. »

Ce sont là des effets mortels des courants de haute fréquence redressés qui sont facilement explicables par la téτανisation des muscles respiratoires, à laquelle s'ajoutent les effets de polarisation des tissus, polarisation qui devient marquée pour des temps prolongés de passage du courant.

MM. Cluzet et Chevallier étudièrent également, et relatèrent dans la même communication, les modifications des réactions électriques des nerfs et des muscles après la mort ou après la curarisation. Ils s'expriment plus loin en ces termes :

« A la suite de la mort, les réactions électriques des nerfs et des muscles se modifient progressivement, et l'on constate, ainsi que l'un de nous l'a montré (1), les caractères de la R. D. Si l'on suit parallèlement les modifications de l'excitabilité aux courants faradique, galvanique et de haute fréquence redressée, on observe que l'excitabilité faradique disparaît la première, puis l'excitabilité à la haute fréquence redressée de haute tension, puis enfin, l'excitabilité à la haute fréquence redressée

(1) Cluzet. Thèse médecine (Toulouse, 1900).

de basse tension et au galvanique. On ne constate jamais d'inversion polaire à la haute fréquence redressée.

C'est ainsi que chez le cobaye, on obtient, trois quarts d'heure après la mort, les intensités liminaires suivantes, en portant l'excitation directement sur le nerf sciatique :

Faradique, inexcitabilité. Galvanique ($N\ Fe = R\ Fe$) 10 milliampères.

Haute fréquence redressée (haute tension) 0,5 milliampère.

Haute fréquence redressée (basse tension) 2 milliampères.

A la 12^e heure, les nerfs sont inexcitables à tous courants.

Après curarisation de la grenouille, il se produit encore un syndrome électrique analogue à la R. D. ; or, on constate également, pour le nerf, la disparition successive des diverses excitabilités électriques, dans l'ordre indiqué ci-dessus ».

Nous sommes d'accord avec les résultats de MM. Cluzet et Chevallier, sauf sur deux points de la deuxième partie de leur note.

En premier lieu, ces auteurs écrivent que l'excitabilité à la haute fréquence redressée de haute tension disparaît avant l'excitabilité à la H. F. R. de basse tension. Nous montrerons plus loin quel est le rôle essentiel de la tension, rôle éminemment favorable à l'excitabilité. Il nous semble qu'il s'agisse là, d'ailleurs, d'une simple erreur de texte puisque les valeurs des intensités liminaires indiquées peu après sont respectivement de 0,5 et 2 milliampères pour ces deux variétés de courant. Les chiffres rapportés par ces auteurs sont en faveur d'une

plus grande excitabilité par les courants de H. F. R. à forte tension.

En second lieu, il est écrit que l'« on ne constate jamais d'inversion polaire à la haute fréquence redressée ». Nous n'avons pas trouvé nous-même cette inversion sur des nerfs de grenouille, tandis que nous nous sommes rendu compte de sa possibilité d'existence chez des malades présentant des signes de R. D. Nous sommes certains que chez l'homme tout au moins, l'inversion de la formule des secousses peut s'observer en cas de R. D. Ce n'est pas là, un signe constant ni de grande valeur, mais dont l'existence est néanmoins indubitable.

Quoiqu'il en soit, dès 1925, MM. Cluzet et Chevallier mettaient ainsi en évidence le rôle essentiel moteur, des courants de haute fréquence redressés et ce fut pour nos recherches un premier guide extrêmement précieux.

§ 2. ACTION SUR LE CŒUR DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS

Nous avons examiné l'influence des courants de haute fréquence redressés sur le cœur en observant d'abord de visu la modification des contractions, puis en utilisant la méthode cardiographique.

Le mode d'excitation est très simple. Nous avons eu recours à un appareil diathermique à lampe dont le courant était redressé par un système à quatre valves thermo-ioniques montées de façon mixte, en série et parallèle.

La grenouille, le bulbe étant sectionné, est fixée le dos contre une planchette, le thorax ouvert. Deux fils métalliques très fins transportant le courant de haute fréquence redressé aboutissent l'un à la pointe du cœur, l'autre à l'oreillette. Le passage du courant est assuré dans la préparation par la manœuvre rapide d'une clef de Morse.

L'intensité du courant doit être réglable. Nous avons utilisé soit un courant de 3 milliampères (intensité fortement supra-liminaire) obtenu par un chauffage minimum des lampes et un couplage minimum des circuits oscillants, soit un courant de 0,2 milliampère (intensité légèrement supra-liminaire) obtenu par la mise en série dans le circuit d'utilisation d'une forte résistance hydraulique, sans self, de 200.000 ohms.

I. Examen de visu du cœur soumis à des excitations par la haute fréquence redressée.

Les effets produits par les courants de H. F. R. sur le cœur sont identiques à ceux produits par les autres formes de courants excito-moteurs.

S'il s'agit d'une excitation liminaire ou légèrement supra-liminaire (0,2 milliampère), de très courte durée, le myocarde répond par une contraction uniquement pendant la phase diastolique, et ne répond pas pendant sa phase systolique. On peut voir par ce simple examen, en dehors de tout tracé, l'existence d'une phase réfractaire systolique, et la présence d'un repos compensateur après la contraction anticipée.

D'ores et déjà, il est facile de constater que les lois de Marey de l'« *inexcitabilité systolique périodique* du

cœur » et de l' « *uniformité du travail du cœur* » s'appliquent à l'action sur le myocarde des courants de H. F. R.

Si l'on répète les excitations liminaires, ou légèrement supra-liminaires, il est facile de voir le cœur devenir de plus en plus arythmique et présenter la trémulation fibrillaire du myocarde pendant 1 ou 2 minutes. Bientôt d'ailleurs le cœur s'arrête complètement, en diastole. Il est possible d'ailleurs de ranimer ultérieurement le cœur en l'humectant avec du sérum physiologique ou du liquide de Ringer, et d'observer plus tard, à nouveau, les mêmes phénomènes ; mais il faut que les excitations ayant frappé le cœur aient été constituées par des courants d'intensité faible, liminaire ou à peine supra-liminaires.

S'il s'agit d'une excitation forte et de courte durée, nettement supra-liminaire (3 milliampères), l'excitation devient « *infaillible* », efficace pendant la systole comme pendant la diastole. Si les excitations sont rapprochées ou si le courant passe en permanence, le cœur présente un état de tétanos extrêmement accusé ; le cœur est soulevé en bloc, sans qu'il soit possible d'y distinguer la moindre contraction fibrillaire.

2. Examen cardiographique du cœur soumis à des excitations par la haute fréquence redressée.

Nous avons utilisé le cardiographe simple et direct de Marey constitué essentiellement par un levier à point fixe intermédiaire portant sur l'un de ses bras un léger poids et sous l'autre bras une petite tige métallique à pied portant sur le cœur ; les contractions cardiaques

sont ainsi transmises au stylet inscripteur qui les inscrit sur un cylindre.

Le cœur est extériorisé du thorax et maintenu dans cette situation grâce à deux bandes de papier fort (deux moitiés de carte de visite) qui appuient sur les parties molles avoisinant le cœur ; le sinus cardiaque est ainsi respecté et on a par ce procédé simple la possibilité de fournir un plan fixe au cœur pendant ses contractions.

Nous avons utilisé également dans cette étude myographique des excitations courtes ou prolongées avec les intensités liminaires ou nettement supra-liminaires.

1. AVEC DES INTENSITÉS LIMINAIRES, ou voisines de cette valeur (0,2 milliampères, la tension étant de 20 volts), nous avons obtenu un premier type de tracés (tracé 1, planche VII). Nous n'avons pas pu enregistrer les temps de passage du courant, l'intensité trop faible du courant n'assurant pas un fonctionnement régulier et satisfaisant du signal de Marcel Deprez.

Quoi qu'il en soit, il est aisé de constater la présence d'*extra-systoles*, succédant à des excitations de courte durée, survenant uniquement *pendant la phase diastolique du cœur* ; ces contractions anticipées sont toujours suivies d'un *repos compensateur typique*. Ce tracé démontre bien que les grandes lois de Marey, signalées plus haut, restent exactes pour les courants de haute fréquence redressés.

Si des excitations faibles (0,2 milliampère) sont fréquemment répétées ou arrivent continuellement sur le cœur, les électrodes étant placées l'une à la pointe, l'autre à la base du cœur, on voit très nettement (deuxième

partie du tracé 1) apparaît un tracé atypique, désordonné, témoignant de la *fibrillation du cœur*. Les amplitudes des contractions cardiaques diminuent instantanément, dès le début des excitations répétées, pour s'arrêter bientôt complètement. La durée de la fibrillation fut de 50 secondes seulement, mesurée par un chronomètre.

Ajoutons que nous avons répété l'expérience sur la pointe du cœur isolée, par section, du reste de l'organe et que nous avons constaté les mêmes phénomènes que sur le cœur entier et en place.

2. AVEC DES INTENSITÉS FORTEMENT SUPRA-LIMINAIRES (3 milliampères, la tension étant de 300 volts environ), nous avons excité le cœur en place, soit par des excitations de très courte durée, soit par des excitations prolongées (tracé 2, planche VII).

Avec des excitations de courte durée, nous avons constaté l'apparition d'extra-systoles pendant la phase diastolique ; ces contractions anticipées étaient alors suivies d'un repos compensateur particulièrement long. Il suffit d'ailleurs, pour s'en rendre compte, de comparer la durée des repos compensateurs des tracés 1 et 2, la rotation du cylindre dans les deux cas étant la même.

Avec des excitations de longue durée, le courant passant continuellement dans la préparation, il se produit un « *tétanos de tonicité* » extrêmement marqué et persistant, ne décroissant que lentement. Ce phénomène est dû à ce que l'excitation est devenue « *infaillible* » (Bowditch), excitant le cœur aussi bien pendant la systole que pendant la diastole.

Nous n'avons pas à insister sur tous ces phénomènes ;

ce sont les mêmes que l'on obtient avec les autres formes de courants excito-moteurs ; ils sont parfaitement classiques depuis les beaux travaux de Marey.

Il était cependant intéressant de savoir comment le cœur se comporterait avec les courants de haute fréquence redressés ; nous avons vu que les effets obtenus étaient les mêmes qu'avec les autres courants ; il n'y a d'ailleurs là aucun fait capable de nous surprendre, puisque les courants de H. F. R. sont des courants polarisés doués d'un grand pouvoir excito-moteur.

Les courants de H. F. R. ont donc la même action sur le cœur que les courants périodiques de basse fréquence à sens constant, comme le courant faradique et que le courant continu de forte intensité.

L'arrêt du cœur s'obtient soit par trémulation fibrillaire du myocarde (avec des intensités liminaires), soit par tétanos de tonicité (avec des intensités supra-liminaires).

CHAPITRE III

Causes de l'excitation neuro-musculaire par les courants de haute fréquence redressés.

Il est classique que les courants de haute fréquence ne produisent aucune excitation motrice des nerfs et des muscles ; nous n'avons pas à rappeler les causes de cette inexcitabilité motrice : différentes théories furent proposées puis repoussées (théorie de la non pénétration du corps par les courants de haute fréquence, théorie de d'Arsonval, de Broca).

La théorie de Nernst sur la polarisation électrique explique aisément, par le manque de polarité de ces courants, leur inaction sur les nerfs et les muscles. Il est intéressant, toutefois, de constater que l'inactivité motrice des courants alternatifs ne devient absolue que pour les courants de haute fréquence proprement dits (fréquence supérieure à 500.000 périodes par seconde).

D'Arsonval montra que, si l'on considère un courant

alternatif, les réponses musculaires qu'il peut produire augmentent, toutes choses égales d'ailleurs, jusqu'à une fréquence optima de 2.500 par seconde (2.500 à 5.000 pour certains auteurs), puis qu'elles diminuent si la fréquence continue à croître, pour disparaître vers 10.000 périodes par seconde.

Or, on sait actuellement que des courants alternatifs ayant une fréquence plus élevée sont capables de produire des phénomènes d'excitation. C'est ainsi que Turrel signalait en 1928, dans une étude générale des actions physico-chimiques des courants interrompus, que des machines productrices de courants de haute fréquence, à haut voltage et faible intensité, sont capables de produire des contractions musculaires, sous forme de contractions fibrillaires. Cet auteur établit une relation entre la fréquence et le voltage du courant appliqué, dans l'importance des effets moteurs qu'ils peuvent produire.

D'une manière générale, plus le voltage est élevé, plus la fréquence doit être grande, pour abolir les effets moteurs des courants alternatifs.

C'est ainsi que P. Lasareff (1918), Kennely et Alexander (1921), avec des fréquences de 11.000 à 100.000 périodes, obtinrent des contractions musculaires chez la grenouille ; Asher (1922), puis S. N. Rshvkin et N. N. Malov (1927) obtinrent, avec des courants de 300.000 périodes fournis par deux lampes à trois électrodes de 500 watts, un tétanos parfait du muscle gastrocnémien de grenouille.

C'est dire que la limite de l'inactivité motrice des courants alternatifs a été reculée fortement depuis les expériences de d'Arsonval ; quoi qu'il en soit, il est indubi-

table que les courants de haute fréquence (500.000 périodes et au-delà) n'ont pas d'action motrice nette.

Nous signalerons simplement, pour mettre en évidence l'importance du phénomène causal, que l'excitation par les courants alternatifs de fréquence élevée est due, pour Lasareff (1927) à la polarisation des tissus (observée malgré les alternances de signe contraire), conditionnée par une relation entre l'intensité du courant et les modifications ioniques produites par le courant ; dans les processus d'excitation par ces courants, les phénomènes de diffusion n'interviendraient pas.

Höfer, dans le laboratoire de Nernst, vérifia d'ailleurs (1927) l'existence des phénomènes de polarisation, avec des solutions salines, sous l'influence des courants alternatifs à grande fréquence.

Nous avons rapporté l'opinion de Lasareff et de Höfer pour mettre en évidence l'importance considérable des phénomènes de polarisation, capables de produire l'excitation neuro-musculaire, même avec des courants alternatifs de fréquence élevée (300.000 périodes par seconde).

Il est évident, par suite, que lorsqu'il s'agit d'un courant de haute fréquence redressé, c'est-à-dire d'un courant polarisé, les phénomènes de polarisation des tissus vont jouer un rôle essentiel dans l'excitation neuro-musculaire. Il existe encore d'autres facteurs, accessoires, pour expliquer l'action excito-motrice des courants de H. F. R. Il s'agit en effet de courants qui ont conservé,

malgré leur transformation, leur caractère oscillatoire ; ils sont formés de demi-ondes élémentaires brèves, peu chargées en électricité, ayant une très grande fréquence, et venant solliciter le muscle un nombre considérable de fois en un temps très court. Il s'agit d'une véritable sommation des excitations, phénomène bien étudié par Keith Lucas. De plus, la nature même de ces courants leur confère une intensité essentiellement et rapidement variable, et l'on sait, depuis les travaux de Lapicque sur lesquels le Professeur Strohl a insisté, que c'est là une condition favorable à leur effet excito-moteur.

Il semble donc normal d'admettre que la contraction musculaire due aux courants de haute fréquence redressés reconnaît pour cause essentielle la polarisation des tissus, et pour causes accessoires la répétition des excitations et la variation régulière de l'intensité électrique des ondes élémentaires qui les constituent.

I. POLARISATION ÉLECTRIQUE DES TISSUS

a. Théorie de Nernst.

Nous rappellerons succinctement les grands faits physiologiques qui marquent l'étude des causes de l'excitation neuro-musculaire. La route suivie depuis Dubois-Reymond et Hoorweg peut être partagée en deux étapes marquées des noms de Nernst et Lapicque.

Nernst, en 1908, émit l'idée que le processus qui cause l'excitation devait être un phénomène de polarisation,

car les conducteurs électrolytiques, et notamment les conducteurs hétérogènes, présentent des phénomènes de polarisation pendant le passage du courant électrique.

Or les fibres nerveuses ou musculaires sont formées de deux « phases » différentes : une enveloppe périphérique (gaine de myéline — péri et endomysium) et une partie centrale (cylindraxe — myoplasme) ; au niveau de la séparation des deux phases doivent se produire des phénomènes de polarisation. Un tissu excitable peut donc être considéré comme une série de cellules placées côte à côte et séparées par des membranes polarisables, car ces membranes cellulaires ont une perméabilité inégale pour les différents ions, de telle sorte que, si elles s'opposent au passage de certains ions, il y aura accumulation à leur niveau d'ions différents, d'où la création de charges électriques qui leur confèrent un signe électrique. Pour les électrothérapeutes, il n'y a là qu'un simple phénomène d'électrolyse : les ions positifs sont attirés par le pôle négatif et inversement les ions négatifs sont attirés par le pôle positif.

Pour les physiologistes, il y a plus : le brusque afflux des ions positifs au pôle négatif est contrebalancé par le phénomène de « diffusion » étudié par Gildmeister, et qui s'oppose à la polarisation, en ce sens que les ions vont du point où ils sont le plus concentrés, au point où ils le sont le moins. Il en résulte ainsi l'apparition « d'électrodes physiologiques », virtuelles mais actives, au sein des tissus, ainsi que l'ont montré Cardot et Laugier.

Nernst calcula alors quelle intensité il faut donner à un courant i pour avoir une même valeur de la polari-

sation au niveau des membranes ; il établit ainsi la loi qui porte son nom :

$$i = \frac{K}{\sqrt{t}}$$

où k est une constante propre au muscle considéré et t la durée de l'excitation.

S'il s'agit d'un courant alternatif ou d'une série d'excitation, la loi devient :

$$i = K\sqrt{N}$$

où N est la fréquence du courant et des excitations élémentaires.

L'intensité liminaire est proportionnelle à la racine carrée de la fréquence.

Cette loi, rapportée à la quantité d'électricité mise en jeu ($Q = K\sqrt{t}$), s'écarte pour des fréquences élevées de la loi de Weiss ($Q = a + bt$).

Nernst constata d'ailleurs, après Hoorweg (1908), cet écart, et l'expliqua par l'intervention d'un « *facteur perturbateur* » qu'il ne put préciser que par un phénomène d'« *accommodation* » du nerf au passage du courant.

S. N. Rshevkin et N. N. Malov, de Moscou, montrèrent d'ailleurs en 1927 que la loi de Nernst n'est applicable que pour des courants dont la fréquence est inférieure à 3.000 périodes par seconde. Au-delà de cette fréquence, la loi qu'il faut appliquer devient :

$$i = KN$$

L'intensité liminaire est proportionnelle à la fréquence.

b. Polarisation d'un conducteur à noyaux Lopicque.

Lopicque avait, lui aussi, constaté l'écart pour des fréquences élevées de la loi de Nernst (loi théorique) et de la loi de Weiss (loi expérimentale). Le nerf est en effet un véritable « *conducteur à noyaux* » (Matteucci), formé d'un noyau central bon conducteur et d'une gaine périphérique, mauvais conducteur. Dès que le courant passe pendant un certain temps, une force contre-électromotrice de polarisation apparaît, si bien que le courant a de plus en plus de peine à passer et s'étale véritablement le long des membranes qu'elle polarise sur des distances de plus en plus grandes, si bien que la polarisation se propage à mesure que le courant passe.

La théorie de Nernst doit donc être complétée. Le facteur principal de l'excitation neuro-musculaire reste bien la polarisation au niveau des électrodes (expérimentales et physiologiques) qui s'accompagne d'une diffusion des ions selon Gildmeister et d'une propagation de la polarisation. Un facteur important de l'excitation devient alors pour Lopicque la variation de l'état électrique le long des membranes ; c'est le « *gradient de polarisation* » (plus ou moins grande rapidité de la diminution de la polarisation) qui excite.

Il s'en suit que, plus une excitation est rapide, plus la diffusion est lente, et plus le pouvoir excitant du courant est marqué ; nous verrons d'ailleurs quel rôle important cette considération peut avoir pour expliquer l'action excito-motrice remarquable des courants de haute fréquence redressés.

Nous avons parlé des mouvements des ions provoqués par le passage du courant, sans spécifier de quels ions il s'agissait.

La question est encore discutée. Pour Lapicque, il s'agirait d'ions (H) et (OH) s'accumulant en un point du nerf ou du muscle. Pour Loeb, ce qui conditionnerait l'excitation serait non pas le nombre des ions positifs ou négatifs, mais la proportion de certains cations entre eux, possédant des propriétés antagonistes sur le muscle ; ce qui compte, c'est le rapport des cations alcalins (Na), (K) et des cations alcalino-terreux (Ca), (Mg), car ces ions ont des pouvoirs biologiques antagonistes.

Lasareff fit une étude très poussée de l'excitabilité neuro-musculaire. Au terme de plusieurs années de recherches, il conclut à l'exactitude de la théorie de Nernst et adopte les vues de Loeb. Pour lui, l'excitation résulte des changements de concentration ionique au niveau des membranes. La contraction apparaît lorsque ces variations ioniques dépassent une limite déterminée. Il ajoute qu'un organe est excité lorsque, pour une composition déterminée de la solution d'albuminoïdes qui le constituent, la concentration en sels vient à changer. Pour chaque organe de composition protéique donnée, le seuil d'excitation correspond à une valeur donnée du rapport des concentrations des cations antagonistes. Il se produirait en outre, au moment des périodes de fermeture et d'ouverture du courant, des modifications de pression osmotique et de tension superficielle des particules colloïdes des organes excitable, qui pourraient prendre part à l'excitabilité neuro-musculaire.

Ces derniers processus sont cependant trop obscurs actuellement, ils sont trop complexes pour qu'on puisse, dans l'état actuel des choses, leur faire une place importante dans la genèse des processus d'excitation.

La cause profonde de l'excitation neuro-musculaire par un courant électrique et en particulier par un courant de H. F. R. est indiscutablement la polarisation des membranes, en conformité avec la loi de Nernst.

2. SOMMATION DES EXCITATIONS

On sait, depuis les travaux fondamentaux de Sherrington (1905), que le problème du fonctionnement d'un centre nerveux se résout au niveau des synapses. Or les synapses doivent remplir certaines conditions pour que l'influx nerveux, produit par une excitation, puisse les franchir.

C'est ce qu'avait déjà remarqué Setschenov en 1868 lorsqu'il constata que des excitations isolées de certains nerfs ne produisent pas de réflexe alors qu'elles en fournissent si elles sont groupées.

Engelmann sur l'uretère, Charles Richet sur les muscles de la pince d'écrevisse constatèrent que ce phénomène s'appliquait au fonctionnement du muscle.

Ce phénomène s'applique au nerf excité par des courants de haute fréquence redressés, en conformité avec les vues d'Adrian et de Keith Lucas, sur la « *sommation* » du nerf. Adrian et Keith Lucas montrèrent en

effet que si un nerf reçoit une série d'excitations sous-liminales, il est excité comme s'il recevait une seule excitation, liminaire ou supra-liminaire, par suite du phénomène de l'« *addition latente* ». Or un courant de haute fréquence redressé est formé de demi-alternances élémentaires, isolées, dont l'intensité de chacune est nettement sous-liminaire.

Il suffit, pour s'en rendre compte de calculer la quantité d'électricité extrêmement petite que transporte l'une des demi-ondes élémentaires. Nous rappellerons les résultats fournis par l'électrolyse avec ces courants. Il nous a fallu notamment, dans l'expérience relatée précédemment, un temps de passage du courant de 22 minutes pour obtenir le dégagement de 1 cm³ d'hydrogène, ce qui correspond à un nombre véritable considérable de demi-ondes du courant pour une faible quantité d'électricité.

Un temps d'excitation de 7 ou 8 centièmes de seconde (comme dans nos enregistrements myographiques) correspond à un nombre de demi-ondes (excitations élémentaires) de 40.000 à 500.000 environ (suivant que la fréquence varie de 700.000 à 7 millions par seconde — cas de nos expériences). Il est évident, par suite, que la quantité d'électricité correspondant à une excitation élémentaire, est fortement sous-liminaire et se trouve incapable de produire à elle seule l'excitation neuro-musculaire.

La sommation des excitations permet d'expliquer l'excitation par ces stimuli sous-liminaires, et la signification physiologique des différentes contractions, ou secousses, de fermeture et d'ouverture, fournit l'explica-

tion de la tétanisation facile, marquée, sans fatigue musculaire appréciable.

a. LA CONTRACTION DE FERMETURE résulte d'un phénomène de sommation, d'addition latente, décrit par Keith Lucas. On peut considérer que chaque excitation élémentaire, sous-liminaire, ne produit pas la contraction mais une modification par début de polarisation du point excité, en accord avec la théorie de Nernst ; il intervient, d'autre part, classiquement, après chaque excitation élémentaire, des phénomènes de diffusion qui tendent à dissiper la modification ionique provoquée par le passage de l'onde excitatrice. Or la diffusion est d'autant plus lente que la fréquence des excitations est plus grande ; elle toujours moins rapide que le phénomène de polarisation, et même n'existerait pas pour les courants de haute fréquence, selon Lasareff.

De toute façon, si une deuxième excitation sous-liminaire survient avant que la diffusion n'ait eu le temps de dissiper les modifications ioniques produites par une première excitation, elle-même sous-liminaire, les variations physico-chimiques de polarisation s'ajoutent et la somme des deux excitations peut produire l'excitation neuro-musculaire.

Dans le cas des courants de H. F. R., en raison de la fréquence considérable des excitations élémentaires, et du peu d'importance de la diffusion, les modifications produites par ces ondes s'ajoutent facilement, et l'excitation du nerf apparaît. La quantité d'électricité transportée par une excitation unique étant infime, la con-

traction de seuil résultera de la somme de nombreuses excitations élémentaires.

On sait, depuis les travaux de M. et Mme Lapicque, que les deux facteurs : polarisation et diffusion, sont fonction de la rapidité du tissu ; les muscles et nerfs très rapides se dépolarisent très vite, si bien que les phénomènes de sommation s'observent plus facilement sur les nerfs blancs à grande chronaxie et inversement.

S'il s'agit d'un muscle strié de grenouille ou d'homme, la diffusion est rapide pour les excitations électriques ordinaires, tandis qu'elle reste malgré tout très lente par rapport à la fréquence des excitations en cas de courants de H. F. R. Lasareff, ainsi que nous le rapportons plus haut, prétend même que la diffusion n'intervient déjà plus dans l'excitation par des courants alternatifs rapides (300.000 périodes par seconde), ce qui expliquerait encore la possibilité d'excitation par ces courants non redressés.

Il en résulte que les courants de haute fréquence redressés excitent le nerf et le muscle, au moment de la période de fermeture, par suite des phénomènes de polarisation et que la contraction de fermeture résulte de la sommation des excitations élémentaires.

b. LA SECOUSSE D'OUVERTURE relève des mêmes processus que pour un courant ordinaire, c'est dire qu'elle reconnaît pour cause une excitation naissant à l'anode, résultant de l'anelectrotonus de rupture (augmentation de l'excitabilité à l'anode), ainsi que le prouva Pflüger.

Pour des temps de passage un peu longs (7 ou 8 centièmes de seconde) du courant de H. F. R., la secousse nu-

mulaire qui apparaît lors de l'ouverture est due à la dernière excitation que reçoit le nerf ou le muscle, et à elle seule, c'est une véritable secousse musculaire au sens physiologique du mot.

La dernière excitation, sous liminaire, suffit à elle seule, à déclencher la secousse de rupture en raison de l'état de polarisation du nerf résultant du passage antérieur du courant.

La cause de l'excitation aux périodes de fermeture et d'ouverture est au fond, la même, les modifications ioniques sont les mêmes, une simple différence de temps les distinguant, les variations ioniques au moment de la fermeture étant rapides (relevant de phénomènes d'électrolyse), et lentes au moment de l'ouverture (relevant de la diffusion).

c. LA TÉTANISATION DU MUSCLE est due à la répétition des excitations élémentaires que reçoit le muscle, relevant du même mécanisme qu'avec le courant faradique. Il est un fait particulier à la tétanisation produite par les courants de haute fréquence redressés ; c'est l'absence de fatigue. On sait qu'un muscle se fatigue peu sous l'influence d'excitations répétées si la diffusion des modifications ioniques peut intervenir en diminuant les effets physico-cliniques de la polarisation.

Lorsqu'il s'agit d'un courant de H. F. R., on peut, par suite, admettre que la diffusion joue un certain rôle pour expliquer l'absence pratique de fatigue chez l'homme. La fatigue existe néanmoins avec ces courants pour une préparation sciatique-gastrocnémien de grenouille, elle est nulle pratiquement pour les muscles de l'homme qui peu-

vent présenter la téτανisation pendant 10 minutes environ.

D'ailleurs la téτανisation n'intéresse pas simultanément toutes les fibres d'un muscle, celles-ci passant par des alternatives de mise en tension et de relâchement.

La fatigue surviendra d'ailleurs, d'autant plus lentement que le voltage du courant appliqué au muscle est plus faible, les modifications ioniques, cause importante dans l'apparition de la fatigue (Turrel), étant proportionnelles au **voltage**.

Il faut préciser l'origine de la téτανisation. Celle-ci apparaît déjà pour des durées relativement courtes du passage du courant (1/10 seconde). Toutes les ondes élémentaires n'agissent pas semble-t-il sur le nerf, si l'on tient compte de l'existence de la « *période réfractaire du nerf* ».

Gotch et Burch ont en effet montré que si un nerf est excité par une première excitation (ou une série d'excitations sous-liminales), puis par une deuxième excitation liminaire, le nerf peut ne pas répondre si cette excitation survient pendant sa phase réfractaire.

Adrian et Keith Lucas vérifièrent ce fait ; K. Lucas appelle « *irresponsive period* » l'intervalle pendant lequel toute excitation secondaire ne provoque pas de variation électrique dans le muscle excité par l'intermédiaire du nerf.

Après une excitation du nerf, suivie de réponse sous forme de contraction musculaire, il faut distinguer successivement une période réfractaire absolue (0 à 0,0025 seconde), puis une période réfractaire relative (0,0025 à 0,012 seconde), et enfin une phase d'hyperexcitabilité

(0,012 à 0,028 seconde) et ce n'est qu'après ce temps que l'excitabilité du nerf redevient normale.

L'intervalle minimum pour lequel deux excitations appliquées à un nerf peuvent s'additionner, dépend de la rapidité de disparition de la période réfractaire.

Dans le cas présent, considérons une contraction de fermeture obtenue par sommation des excitations. Le courant de H. F. R. arrivant continuellement au nerf, les afflux excitants qui vont suivre les excitations qui furent suivies de réponse, sont inefficaces puisqu'ils tombent pendant la phase réfractaire absolue du nerf, et ne sont pas transmis au muscle. Pendant la phase réfractaire relative, les seuils de contraction s'élèvent, l'influx nerveux peut gagner le muscle et produire son excitation si le voltage est suffisant. C'est pendant la phase d'hyperexcitabilité du nerf que les excitations élémentaires permettront d'obtenir le plus facilement la réponse neuro-musculaire, toujours par le mécanisme de la sommation.

Les excitations élémentaires arrivant continuellement au nerf — nous parlons d'alternances continues sans périodes de silence — auront donc un rôle différent dans l'apparition de la téτανisation, certaines excitations étant inefficaces, d'autres étant efficaces. La téτανisation apparaît ainsi comme formée non d'une contraction égale et soutenue de toutes les fibres musculaires, mais comme la juxtaposition de contractions fibrillaires isolées, indépendantes, très rapprochées dans le temps.

S'il s'agit d'ondes séparées par des intervalles de silence égaux aux périodes oscillatoires, le mécanisme de la téτανisation reste le même ; il s'agit même d'un cas

éminemment favorable à l'apparition de la téτανisation, toutes choses égales d'ailleurs. La durée des trains d'ondes est de 0,01 seconde. Si nous considérons un nerf excité par un tel courant fourni par un poste diathermique alimenté par un courant alternatif de 50 périodes par seconde, la phase d'hyperexcitabilité étant située de 0,012 à 0,028 seconde après l'excitation du nerf, on voit qu'un train d'ondes survient et dure de 0,01 à 0,02 seconde, coïncidant presque exactement avec la durée de la phase d'hyperexcitabilité.

La téτανisation résulte donc bien d'une juxtaposition de contractions élémentaires, survenant malgré tout, en raison de la très faible durée de la période réfractaire du nerf (0,0025 sec.), à une grande fréquence, ce qui permet à ce phénomène d'avoir une véritable continuité apparente.

Cette juxtaposition de contractions élémentaires explique également le mécanisme intime de l'apparition tardive, surtout chez l'homme, de la fatigue puisque les fibres musculaires passent pendant le passage continu du courant par des phases discontinues de repos et de mise en tension.

3. ETAT VARIABLE DE L'INTENSITE EXCITATRICE

On sait actuellement depuis les travaux de Lapique (1907) que des courants mettant en jeu une même quantité d'électricité, peuvent avoir des effets excito-moteurs différents selon que l'intensité est constante ou variable.

Le P^r Strohl étudia (1922) cette influence de l'état variable de l'intensité sur l'excitation neuro-musculaire et écrivit que « *parmi les courants qui mettent en jeu une quantité donnée d'électricité dans un temps donné, ce sont ceux dont l'intensité reste constante qui sont le moins efficaces* ».

Laugier retrouva, sur le schéma hydraulique de Lapique, les mêmes effets, précisant simplement que ce fait ne pouvait pas faire réadmettre l'ancienne loi de Dubois-Reymond sur le rôle primordial de la densité du courant.

MM. Strohl et Fabre étudièrent en outre (1927) l'efficacité respective des ondes cunéiformes décrites par Fabre (1927) et des ondes rectangulaires obtenues par des courants constants interrompus par l'ergésimètre de Strohl.

Ces dernières recherches confirmèrent pleinement « *le principe de moindre excitabilité des courants continus par rapport aux courants d'une autre forme émettant des quantités d'électricité égales dans des temps égaux* » (Strohl et Fabre).

Ce principe n'admet pas d'exception, il est normal de l'appliquer à l'excitation par les courants de haute fréquence redressés.

L'état variable du courant exciteur est une circonstance favorable à son action excito-motrice, mais ce n'est là qu'un facteur accessoire de la contraction.

*
* *
*

L'étude précédente montre que les courants de haute fréquence redressés excitent le nerf et le muscle pour différentes raisons, d'importance inégale. La cause essen-

tielle de l'excitation par ces courants est la polarisation des tissus, en conformité avec la théorie de Nernst et les conceptions de Lapicque.

La possibilité d'obtenir la contraction de fermeture et la téτανisation, repose sur le phénomène de la sommation des excitations, bien décrite par Adrian et Keith-Ducas.

L'absence pratique de fatigue au cours de la téτανisation est due à l'existence de la période réfractaire « (*irresponsiv period* » de K. Lucas), et de la phase d'hyperexcitabilité, du nerf après l'excitation de sorte que la téτανisation apparaît comme une véritable juxtaposition, à fréquence élevée, de contractions fibrillaires simples.

L'existence d'un état variable de l'intensité du courant réalise, en conformité avec les idées de Lapicque et du P^r Strohl, une condition particulièrement favorable pour l'action excito-motrice remarquable des courants de haute fréquence redressés.

CHAPITRE IV

Facteurs de la contraction musculaire par les courants de haute fréquence redressés.

Nous rappelons que toutes nos expériences furent faites avec un courant à ondes entretenues émises par un poste de T. S. F. Les ondes sont d'amplitude parfaitement égales (à 1/100 près, si le courant est filtré), et ne sont pas séparées par des périodes de silence, si bien qu'en des temps égaux, les quantités d'électricité sont égales, et que l'on se trouve ainsi, toutes choses égales d'ailleurs, toujours dans les mêmes conditions expérimentales. Nous avons étudié l'influence sur la contraction musculaire de 3 facteurs : l'intensité du courant exciteur (ou du moins l'intensité efficace indiquée par un milliampèremètre électromagnétique disposé à la sortie du redresseur), la tension appliquée au sujet et la fréquence du courant exciteur. Il va sans dire que nous avons fait varier un seul facteur à la fois, les deux autres restant rigoureusement ou sensiblement constants.

Pour l'étude de la contraction, le sujet était situé dans le circuit d'utilisation, fermé sur lui par deux électrodes spongieuses imbibées d'eau : l'électrode indifférente sur la face antérieure de l'avant-bras, l'électrode active (de polarité variable) sur le trajet du nerf médian au poignet ou sur la base des muscles de l'éminence thénar. Nous avons préféré ce deuxième mode en raison des sensations moins marquées qu'il donne au moment des fortes tétanisations.

Nous avons pris pour tests physiologiques soit les contractions liminaires, soit la première téτανisation nette ; dans certaines conditions nous avons été obligés de comparer l'amplitude des contractions supra-liminaires.

A. INFLUENCE DE L'INTENSITE

L'intensité du courant de H. F. redressé est modifiée de 3 façons :

— Soit en modifiant la tension plaque des Kénotrons alimentant la lampe oscillatrice du poste de T. S. F., par l'intermédiaire d'un rhéostat agissant sur le filament des kénotrons.

— Soit en modifiant le potentiel de chauffage du filament de la lampe triode oscillatrice, par un autre rhéostat.

— Soit en modifiant le potentiel de chauffage du filament des valves thermo-ioniques du redresseur, par l'intermédiaire d'un 3^e rhéostat.

La longueur d'onde est maintenue constante, ce qui est facile par l'intervention du condensateur variable. La longueur d'onde est mesurée par un ondemètre de Tissot, préalablement étalonné.

La tension est indiquée par un voltmètre placé en dérivation aux bornes d'utilisation du redresseur. Mais il est impossible de maintenir la tension rigoureusement fixe lorsque varie l'intensité ; ces deux facteurs varient dans le même sens. Nous avons rendu la tension constante par l'utilisation d'une résistance hydraulique (sans self induction et sans capacité) placée en série avec le voltmètre suivant la disposition indiquée plus loin (voir B : influence de la tension).

I. Vérification de la loi des secousses de Pflüger.

Avec des excitations de courte durée, nous avons pu obtenir distinctement les quatre contractions ou secousses de fermeture et d'ouverture avec le pôle négatif et positif. Nous donnons le résultat d'une de nos expériences :

Intensités efficaces mA	Tension appliquée volts	Long. d'ondes m.	Secousses liminaires
1,5	130	324	NFe
2,8	200	—	PFe
5	250	—	POS
5,5	300	—	NOS

Remarquons que la tension s'est accrue de façon très sensible (du simple au double), la longueur d'onde étant restée égale à 324 mètres. Cette expérience n'est pas entachée d'erreur bien que la tension ait varié ; nous verrons

en effet que la tension favorise la contraction de sorte que nous avons obtenu les secousses autres que N. F. avec des intensités relativement faibles, plus faibles que celles qui les provoqueraient réellement avec une tension égale à 130 volts (tension qui correspond à N. F.).

Les chiffres des intensités liminaires n'ont aucune valeur absolue, ils sont propres à chaque valeur de la tension et de la longueur d'onde.

Quoi qu'il en soit, on peut formuler la loi des secousses dans le même sens qu'avec le courant galvanique

$$\text{NFe} > \text{PFe} > \text{POS} > \text{NO S}$$

2. Influence de l'intensité sur l'apparition de la téτανisation.

Nous avons opéré avec des longueurs d'onde de 60 mètres et de 310 mètres, nous donnons le résultat de quelques expériences dans le tableau suivant.

Long. d'onde m.	Tens. H.F.R. appliquée volts	Intensités mA	Contractions
60	28	7	NFe liminaire
—	30	10	Tétanisation légère
310	160	2,5	NFe supra-limin.
—	—	4	contract. + forte
—	—	5	Tétanisation légère
—	—	6	Tétanisation forte

Il est net, comme cela est d'ailleurs normal, que l'intensité de la contraction musculaire (contraction simple ou téτανisation), varie dans le même sens que l'intensité de l'excitation.

B. INFLUENCE DE LA TENSION APPLIQUÉE

L'intensité et la longueur d'onde restent constantes, dans l'étude du rôle de ce facteur dans la contraction musculaire.

I. Il existe un seuil de tension.

Un minimum de tension appliquée est nécessaire à l'apparition de la contraction. La tension appliquée E^v est mesurée par un voltmètre en dérivation aux bornes de sortie du redresseur. Nous avons fait des mesures soit avec une intensité de 7 m A eff. soit avec une intensité de 8 m A eff., la longueur d'onde étant toujours égale à 60 mètres.

Long. d'onde m.	E volts	I. eff. mA	Contraction
60	20	7	pas de contraction
—	28	7	N.Fe liminaire
—	32	7	N.Fe supra-limin.
—	23	8	N.Fe liminaire
—	30	8	N.Fe supra-limin.

On voit donc :

a. Qu'une intensité de 7 m A donne :

aucune contraction si la tension appliquée est de 20 volts	
N. F. liminaire	— 28 volts
N. E. supra-liminaire	— 32 volts

b. qu'une intensité de 8 m A donne de même :

N. F. liminaire si la tension appliquée est de 23 volts

N. F. supra-liminaire — — — 30 volts

c. qu'une intensité de 7 m A donne une contraction supra-liminaire si la tension est de 32 volts

tandis qu'une intensité de 8 m A ne donne que la contraction liminaire si la tension est de 23 volts

Ce tableau met bien en évidence *l'influence considérable de la tension sur la contraction musculaire puisqu'une certaine intensité (7 m A) peut donner une contraction plus forte qu'une intensité supérieure (8 m A) avec une tension appliquée convenable.*

Un minimum de tension est de plus nécessaire pour produire l'excitation musculaire.

2. Influence de la tension appliquée.

Le rôle de ce facteur apparaît encore plus nettement en employant des tensions très différentes.

Pour augmenter la tension, nous avons utilisé des phénomènes de résonance, en employant (comme nous l'avons signalé lors de la description de notre poste de T. S. F.) un circuit capteur d'ondes bien plus long que le circuit oscillant proprement dit.

Nous avons utilisé pour la mesure de la tension appliquée un voltmètre mesurant au maximum une différence de potentiel de 120 volts et que nous avons mis en série avec une résistance hydraulique, sans self ni capacité,

l'ensemble étant en dérivation sur les bornes du redresseur, selon le schéma indiqué.

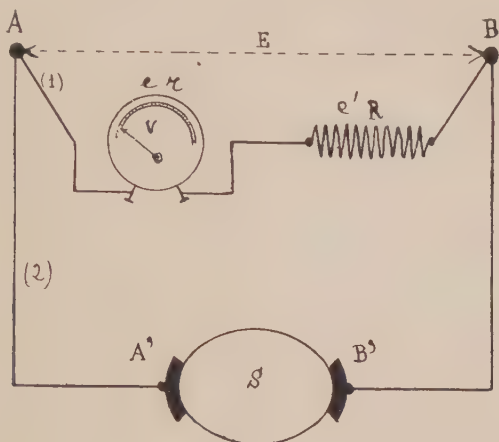


FIG. 27. — Appréciation du voltage réel appliqué au sujet.

Dans le circuit (1), on peut écrire :

$$\begin{aligned} e &= ri & r \text{ étant la résistance du voltmètre} \\ e' &= Ri & R \text{ — hydraulique} \end{aligned}$$

$$\text{d'où } \frac{e}{r} = \frac{e'}{R}$$

$$\frac{e'}{e} = \frac{R}{r}$$

$$\frac{e' + e}{e} = \frac{R + r}{r} \quad \text{or} \quad e' + e = E$$

d'où l'on tire :

$$E = e \frac{R + r}{r}$$

Si l'on suppose que l'introduction du sujet dans le circuit (2) occasionne peu de perturbation dans le circuit (la résistance du sujet étant faible pour les courants de haute fréquence) on obtient la valeur de la tension appliquée au sujet en A' B'.

L'influence de la tension est considérable sur les qualités de l'excitation, conditionnant pour une grande part l'apparition des contractions de seuil et celle de la téta-nisation. Nous avons recherché cette influence avec des longueurs d'onde de l'ordre de 50 à 100 mètres, et de l'ordre de 300 à 500 mètres.

Dans de nombreuses expériences nous avons toujours constaté l'action favorisante de la tension appliquée sur l'apparition des contractions. Nous citerons simplement un exemple dans chaque cas :

a. ACTION DE LA TENSION SUR LES CONTRACTIONS OBTENUES
PAR DES COURANTS A LONGUEUR D'ONDE « COURTE ».

α. Influence sur l'apparition de la contraction négative-fermeture (N. Fe).

λ^m	e^v	E^v	R_{ω}	I_{mA}	Contractions
55	28	28	0	3,2	pas de contraction
55	9	180	600.000	3,2	secousse nettement supra-liminaire

β. Influence sur l'apparition de la tétanisation.

λ^m	e^v	E^v	$R\omega$	I^{mA}	Contractions
60	40	40	0	10	Contraction NF sans tétanisation
60	5	100	600.000	6	Tétanisation nette

Il est facile de voir l'influence de la tension, surtout dans le deuxième exemple, où une intensité de 6 milliam-pères produit la tétanisation tandis qu'une intensité de 10 mA ne produit qu'une contraction supra-liminaire.

Ce rôle est tout aussi net pour des ondes plus longues.

b. ACTION DE LA TENSION SUR LES CONTRACTIONS OBTENUES PAR DES COURANTS A PLUS GRANDE LONGUEUR D'ONDE.

Nous signalerons un exemple pris parmi d'autres.

α. Influence sur l'apparition de la contraction négative-fermeture.

λ^m	e^v	E^v	$R\omega$	I^{mA}	Contractions
340	30	30	0	5	pas de contraction
340	16	112	200.000	5	Contraction supra- limin. sans tétanis.

β. Influence sur l'apparition de la tétanisation :

La tension agit encore dans le même sens et son action est nette pour toute l'échelle des tensions. Nous citerons

un exemple intéressant des tensions appliquées, nettement plus élevées que dans les cas précédents.

λ^m	e^v	E^v	R^w	I^{mA}	Tétanisation
340	114	1.000	200.000	5	légère
—	100	2.000	600.000	5	marquée

On peut donc dire que *la tension a une action favorisante certaine sur la contraction ; elle est capable à elle seule, si elle est supérieure à une valeur minimale de seuil (environ 20 ou 22 volts) de provoquer ou de modifier la contraction ou la tétanisation musculaire, indépendamment, dans une certaine mesure, de l'intensité du courant excitateur.*

Si la tension continue à croître (par l'augmentation de la tension du courant de haute fréquence), on obtient des tétanisations violentes, voire même douloureuses, mais seulement pour des valeurs élevées de la tension appliquée atteignant ou dépassant 6000 volts (l'intensité étant égale ou supérieure à 10 milliampères).

Nous signalerons d'ailleurs combien le facteur tension est important par un exemple purement qualitatif. Nous avons écrit avec notre maître M. le P^r Cluzet (Arch. Elect. Méd. février 1931) que le seuil de contraction (N. F.) était obtenu avec un poste Chenaille à lampe de 300 watts pour une intensité de 0,4 milliampère efficace (indiquée par un milliampèremètre électromagnétique) tandis que le seuil n'apparaît avec notre poste de T. S. F. (pouvant donner jusqu'à 120 watts seulement) qu'avec des intensités de l'ordre de 3 ou 4 milliampères efficaces (indiquées

par le même appareil). C'est là un exemple de plus en faveur du rôle très favorable de la tension sur l'action des courants de H. F. R., exemple qui met aussi en évidence les valeurs très différentes des intensités liminaires suivant l'appareil générateur de haute fréquence.

C. INFLUENCE DE LA LONGUEUR D'ONDE

1. Production de courants à longueur d'onde différente.

Pour obtenir avec le même poste émetteur de T. S. F. des courants de longueur d'onde différente, il suffit d'agir sur les termes L et C de la formule de Thomson

$$T = 2 \pi \sqrt{LC}$$

où L et C représentent respectivement le coefficient de self induction et la capacité du circuit oscillant.

Pour agir sur L de façon nette il faut avoir recours à un jeu de bobines de self induction très différentes. C'est ainsi que pour obtenir des longueurs d'onde comprises entre 200 et 500 mètres nous avons employé une bobine (dont nous avons indiqué précédemment les caractéristiques) possédant un coefficient de self-induction de 18.10^{-5} Henrys. Pour des ondes de l'ordre de 50 à 100 mètres nous avons utilisé une bobine ayant un coefficient de self de 2.10^{-5} Henrys.

La capacité du circuit est liée à la capacité variable d'un condensateur à air à lames mobiles et lames fixes bien isolées les unes des autres, et doit être construit pour présenter le minimum de pertes électriques. La variation

de position des plaques mobiles par rapport aux plaques fixes conditionne la valeur du facteur C de la formule de Thomson. Remarquons toutefois que les variations de ce facteur C donnent une gamme beaucoup moins étendue de longueur d'ondes, que celles du facteur L.

Nous avons indiqué précédemment le mode de mesure des longueurs d'ondes par les ondemètres, nous n'y reviendrons pas.

2. Influence de la longueur d'onde sur les contractions musculaires.

Il était nécessaire, pour comparer ainsi les actions excito-motrices obtenues avec diverses valeurs de la fréquence, de rendre constante, autant que possible la tension appliquée aux électrodes ; nous avons déjà montré en effet, que pour la même fréquence, l'intensité liminaire est beaucoup plus faible avec les tensions élevées qu'avec les tensions basses.

Or nous pouvions agir sur la tension aux électrodes de deux manières : soit en modifiant la tension fournie par l'appareil de haute fréquence, soit en introduisant des résistances liquides additionnelles dans le circuit d'utilisation, après le redresseur de haute fréquence, et en dérivation sur les électrodes ; un voltmètre électromagnétique donnait les valeurs correspondantes de la tension. Le voltage étant maintenu constant nous faisons varier l'intensité excitatrice en agissant sur le courant de chauffage des valves du redresseur de haute fréquence.

Nous rapporterons deux résultats d'expériences don-

nant le seuil de la contraction négative fermeture (N. Fe) et les seuils des autres secousses :

λ^m	T ^v	E ^v	R _{to}	I ^{mA}	Secousses liminaires
55	1.000	64	225.000	2,9	N.Fe
400	300	64	0	3,3	N.Fe

où A est la longueur d'onde, T la tension de la haute fréquence avant redressement, E la tension de HF. redressée entre les électrodes et R la résistance liquide en dérivation sur les électrodes

Remarquons qu'il est bien difficile de maintenir E constant alors que i augmente, nous avons cité l'exemple ci-dessus où nous n'avions pas observé de modification de la tension (indiquée par un voltmètre sensible) pour une variation de 0,4 milliampère (indiquée par un milliampère-mètre électro-magnétique).

L'influence de la longueur d'onde se manifeste aussi pour les secousses musculaires de fermeture et d'ouverture. Nous rapportons une expérience mettant ce fait en évidence :

λ^m	T	E	R	I	Secousses liminaires
55	1.000	28	0	3,3	N.Fe
—	—	30	—	3,5	P.Fe
—	—	32	—	5	P.O.S.
324	200	30	0	3,8	N.Fe
—	300	35	—	4,0	P.Fe
—	400	40	—	5,5	P.O.S.

La secousse d'ouverture, l'électrode active étant négative ne peut être discernée de la tétanisation, car elle nécessite une intensité qui tétanise le muscle et rend l'appréciation de cette secousse difficile.

Les intensités liminaires sont donc toujours plus faibles avec les ondes courtes qu'avec les ondes longues.

Si l'on considère, comme test, non plus l'apparition des diverses secousses mais l'apparition de la tétanisation, on obtient le début de celle-ci pour des intensités différentes selon la longueur d'onde considérée, comme l'indiquent les chiffres suivants :

λ^m	T ^v	E ^v	ImA	Tétanisation
55	1.000	64	3,1	début de la tétanisation
308	300	70	4,8	—

Remarquons que s'il existe une différence de tension entre les deux expériences, elle est en faveur de la deuxième expérience puisqu'elle est supérieure de 6 volts à celle de la première expérience ; cela n'empêche néanmoins pas la tétanisation d'apparaître avec une intensité plus grande dans le deuxième cas que dans le premier.

Remarquons en outre que les chiffres cités plus haut n'ont que la valeur d'exemple ; ils n'ont pas de valeur intrinsèque, car chaque expérience donne des valeurs des intensités liminaires qui lui sont propres, fonction de la longueur d'onde et de la tension appliquée.

Ce qu'il faut retenir, c'est que *les courants de haute fréquence redressés produisent le seuil de la contraction*

musculaire avec des intensités liminaires qui augmentent avec la longueur d'onde et par suite diminuent quand la fréquence augmente. L'action excito-motrice varie donc dans le même sens que la fréquence, toutes choses égales d'ailleurs.

Il y a là un point qui s'oppose à celui que présentent les courants alternatifs de fréquence élevée et doués de pouvoir excito-moteur. Nous avons vu en effet que la loi de Nernst devait être modifiée, pour Rshevkin et Malov en ce sens que pour de tels courants l'intensité liminaire deviendrait proportionnelle à la fréquence des excitations.

Il est vrai qu'il s'agit de deux modalités excitatrices différentes, les courants alternatifs ayant un caractère oscillatoire net tandis que les courants de H. F. R. sont essentiellement des courants polarisés.

Dans la première modalité d'excitation la diffusion n'agirait plus (Lasareff-Höfer), dans la deuxième elle existe (en raison de l'unique polarisation produite par ces courants et de la fatigue faible présentée par les muscles soumis à ce genre d'excitations) et peut expliquer un repos partiel des muscles entre chaque onde qui leur permet de réagir plus facilement à des courants de fréquence croissante.

Nous avons fait porter ces recherches uniquement sur les muscles de l'homme, et non sur la grenouille en raison des erreurs que nous aurions fatalement commises dans la mesure des intensités liminaires (0,1 milliampère environ), résultant de l'inexactitude des renseignements fournis par les milliampermètres.

Nous considérons néanmoins que les résultats obtenus chez l'homme sont suffisamment constants et probants pour nous faire adopter la conclusion citée plus haut.

L'importance des réactions motrices produites par l'excitation par les courants de haute fréquence redressés dépend donc de trois facteurs : l'intensité, la tension appliquée et la fréquence du courant.

L'influence de ces trois facteurs est inégale. La fréquence exerce une action favorable sur la contraction, mais dans des limites restreintes ; l'intensité du courant provoque à tension constante des modifications de même sens des réponses musculaires, dans des limites également restreintes.

C'est la tension appliquée au muscle considéré qui joue, et de très loin, le rôle le plus important dans l'apparition des caractères de la contraction musculaire. Un minimum de tension est nécessaire (20-22 volts) pour obtenir une réponse motrice à l'excitation et au dessus de ce seuil de tension, l'amplitude et l'intensité de la contraction musculaire croissent rapidement à mesure que s'élève la tension ; la réponse musculaire passe rapidement de l'état de contraction simple à celui de téτανisation.

Troisième Partie

**APPLICATIONS CLINIQUES
DES COURANTS
DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS**

CHAPITRE PREMIER

Applications diagnostiques et thérapeutiques des courants de haute fréquence redressés.

§ 1. TECHNIQUE D'UN ELECTRODIAGNOSTIC

Nous venons d'exposer le mode d'obtention des courants de haute fréquence redressés et leurs propriétés physiques et physiologiques. Nous avons mis en évidence la facilité de leur production à partir d'un appareil émetteur de haute fréquence et leur pouvoir excito-moteur considérable. Nous avons dit que tout appareil générateur de courants de haute fréquence était susceptible par l'adjonction d'un redresseur de produire l'excitation neuro-musculaire. Dans la pratique courante, s'il est difficile d'avoir à sa disposition un appareil type d'Arsonval, ou un poste émetteur de T. S. F., il est au contraire facile d'avoir un poste diathermique.

Depuis la description des effets de la d'Arsonvalisation, la diathermie a pris jour et a connu un essor vraiment prodigieux, le nombre des appareils diathermiques est allé sans cesse en croissant. Actuellement, un grand nombre de médecins praticiens possèdent un tel appareil et c'est pourquoi nous insistons sur ce point : *« c'est qu'un appareil diathermique, quel qu'en soit le type, peut servir pour l'électrodiagnostic. Il suffit pour qu'il réponde à son nouveau rôle, de lui adjoindre un redresseur de courant »*.

Ainsi pour pratiquer un examen moteur du nerf ou du muscle il faut et il suffit de posséder un poste diathermique et un redresseur de courant.

Nous avons rappelé les types principaux de poste diathermique ; tous peuvent servir. Nous avons signalé (1^{ère} Partie, Chap. II, § 4) les dispositions diverses des valves thermo-ioniques du redresseur ; le redresseur de Cluzet et Chevallier fonctionne généralement en utilisant une seule alternance. Nous rappelons qu'il est constitué essentiellement par 4 lampes triodes, et qu'il comporte comme pièces accessoires deux rhéostats et deux voltmètres pour graduer et mesurer le potentiel de chauffage des filaments, assuré par le courant du secteur (110 volts, 50 périodes) et dévolté entre 4 et 8 volts. Un milliampèremètre électromagnétique shunté (5 ou 50 milliampères) donne des indications suffisantes sur l'intensité efficace du courant redressé. Deux clefs de Morse donnent une polarité de signe différent à l'électrode active.

La disposition du circuit pour un électrodiagnostic est simple : les bornes d'utilisation de l'appareil diathermique sont reliées par deux fils isolés aux bornes du redres-

seur marquées « Haute Fréquence », tandis que les bornes du redresseur marquées « Utilisation », et affectées des signes + et —, sont reliées à deux électrodes spongieuses imbibées d'eau, de surface inégale qui sont de ce fait, l'une indifférente, l'autre active, chacune étant pourvue d'un signe contraire.

Le sujet examiné est assis ou couché, les muscles relâchés. Dans l'exploration par la méthode monopolaire, l'électrode indifférente est placée à la racine du membre ou sur un segment de celui-ci, tandis que l'électrode active est appliquée aux points moteurs des nerfs ou des muscles. Si l'exploration par la méthode bipolaire est rendue nécessaire pour éliminer des mouvements diffus, on opère simplement avec deux petites électrodes de surfaces égales, rapprochées à une distance convenable l'une de l'autre.

Le courant excitateur est envoyé dans le sujet par la manœuvre des clefs de Morse, qui commandent la polarité de l'électrode active. On peut agir sur les caractères de l'excitation par trois moyens :

1. La durée de l'excitation est variable.

Si elle est très brève, de l'ordre de $1/10^{\circ}$ seconde (manœuvre rapide de la clef de Morse) la contraction est elle-même brève et l'on peut apprécier parfaitement, de façon extrêmement nette, les caractères de la contraction qui peut être vive ou lente. Si cette durée est plus longue, de l'ordre de la seconde, la contraction simple disparaît pour faire place à la téτανisation qui prend et

soulève le muscle en masse, même (nous le verrons plus loin) en cas de réaction de dégénérescence.

2. La tension du courant excitateur est réglable.

La modification de la tension appliquée est importante. Par comparaison avec des muscles sains, on verra parfois qu'il est nécessaire d'augmenter la tension. Cette augmentation s'impose pour obtenir la tétanisation des muscles présentant une forte hypoexcitabilité. Nous avons vu qu'on pouvait agir sur la tension du courant de haute fréquence : en augmentant le chauffage des kénotrons redresseurs sur un poste de T. S. F. par exemple. Pour un poste diathermique, la tension est toujours suffisante.

3. L'intensité du courant est réglable.

Les modifications de l'intensité sont très faciles à obtenir, par le réglage (assuré par des rhéostats) du potentiel de chauffage des filaments des valves du redresseur.

En pratique ces manœuvres sont d'une grande simplicité. Les connexions étant faites et le système : poste diathermique-redresseur étant en état de marche, il suffit pour faire varier les conditions d'examen, d'agir sur les rhéostats de chauffage des valves du redresseur pour modifier l'intensité du courant appliqué et de manœuvrer la clef de Morse avec une rapidité plus ou moins grande pour faire varier la durée de l'excitation.

§ 2. UTILISATION DIAGNOSTIQUE DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS

Nous avons eu l'occasion d'examiner plusieurs malades (1) atteints de paralysies d'origine traumatique ou infectieuse. Nous avons pratiqué leur électrodiagnostic suivant la technique indiquée dans le paragraphe précédent et nous avons comparé les résultats ainsi obtenus avec ceux fournis par les méthodes classiques, reposant sur l'emploi des courants faradique et galvanique.

Nous avons effectué cette comparaison, en employant comme mode d'examen électrique, la méthode des condensateurs de M. le P^r Cluzet, méthode actuellement classique. Nous nous bornerons à rappeler que cette méthode repose sur l'analogie physiologique entre l'excitation produite par les courants faradique et galvanique d'une part et les décharges des condensateurs d'autre part.

On sait bien depuis les travaux princeps de M. le P^r Cluzet que la décharge non oscillante d'un condensateur a une durée proportionnelle à sa capacité, la résistance du circuit de décharge (sujet examiné) restant constante. Par suite, en utilisant des décharges de condensateurs de capacités différentes on aura des déchar-

(1) Nous remercions M. le P^r Froment, médecin de l'Hôtel-Dieu, qui a bien voulu nous confier plusieurs malades de son service, en vue de pratiquer leur électro-diagnostic.

ges brèves ou des décharges longues. Les décharges de condensateurs ayant une capacité inférieure à $1/10$ de microfarad sont analogues au point de vue excito-moteur à l'excitation produite par le courant faradique, tandis que les décharges de condensateurs comprises entre $1/10$ et 5 microfarads sont analogues aux excitations provoquées par le courant galvanique.

A. Examen des nerfs et muscles sains.

Il faut toujours comparer les résultats obtenus sur des muscles malades avec ceux qui correspondent au côté sain.

Nous avons signalé plus haut (2^e partie, Chap. III, § 2) que la loi des secousses de Pflüger était applicable aux contractions produites par ce courant chez l'homme. La contraction négative de fermeture apparaît la première, pour une intensité allant de 0,4 à 2 milliampères environ, suivant la tension appliquée. Si l'intensité croît, bientôt apparaissent les deux secousses suivantes : positive-fermeture (P. F.) et positive-ouverture (P. O.). La secousse négative d'ouverture est difficilement discernable car elle nécessite une intensité qui provoque une contraction tétanisante. Il est difficile d'obtenir d'ailleurs les contractions P. F. et P. O. avec un poste diathermique car la tension fournie est capable de faire apparaître rapidement la tétanisation qui masque les contractions simples. Nous n'avons discerné nettement ces contractions qu'avec un poste émetteur de T. S. F. donnant 120 watts, tandis que notre poste dia-

thermique de 300 watts ne nous en permettait pas nettement l'observation.

La téτανisation apparaît entre 1, 3 et 6 milliampères, selon la valeur de la tension qui varie entre quelques centaines de volts et 100 volts (poste diathermique de 300 watts, ou de T. S. F. de 90 watts).

Au cours d'un électrodiagnostic il sera bon de rechercher d'abord des contractions simples, puis la téτανisation. Pour se rendre indépendant, dans une certaine mesure, des modifications de la tension, il suffit (pour des postes diathermiques) d'agir sur la durée de l'excitation (ainsi que nous l'avons signalé au paragraphe précédent), pour obtenir soit les contractions simples, soit la téτανisation.

B. Examen dans les cas pathologiques.

La méthode que nous préconisons donne des renseignements précis dans les cas de réaction de dégénérescence nerveuse nette ou avancée, et dans les cas de section tendineuse, musculaire ou nerveuse récente. Dans les cas où la dégénérescence nerveuse n'est qu'à son stade initial, la méthode fournit des renseignements sur l'hypoexcitabilité ou l'hyperexcitabilité du nerf.

S'il s'agit d'un processus dégénératif accusé du nerf, s'accompagnant de réaction de dégénérescence (R. D.), ou d'élévation forte de la chronaxie, il est bon d'avoir recours à des excitations plus ou moins longues donnant soit les contractions isolées, soit la téτανisation.

S'il s'agit de section musculaire, tendineuse ou nerveuse, récentes ou anciennes ou s'il s'agit de contrôler les résultats éloignés d'une suture de ces organes, il est préférable, surtout si le muscle intéressé est volumineux et pris dans un groupe musculaire puissant, d'opérer par la méthode bipolaire et de chercher à obtenir des tétanisations. Cette modalité de contraction mettra mieux en évidence l'existence ou l'absence de telles lésions.

Nous rapportons, à titre d'exemples, quelques résultats d'électro-diagnostic récemment obtenus. Les observations se bornent à un très bref résumé. Nous signalons les résultats obtenus par l'examen aux condensateurs et en haute fréquence redressée.

Nous avons groupé les observations sous les titres de :

Séquelles de poliomyélite antérieure.

Polynévrites et paralysies infectieuses.

Lésions traumatiques des nerfs.

Sections tendineuses et musculaires ou sections nerveuses récentes.

1) Séquelles de poliomyélite antérieure.

I. — A... Ch..., 19 ans (malade du Service de M. le P^r FROMENT).

Séquelles de poliomyélite antérieure aiguë. Début de l'affection en octobre 1930.

Actuellement : Paralysie complète des muscles du dos et des membres inférieurs (muscles de la loge antéro-externe et muscles postérieurs).

a) Examen aux condensateurs.

NERFS ET MUSCLES	COTE DROIT		COTE GAUCHE		CONCLUSIONS
	Déch. courtes	Déch. longues	Déch. courtes	Déch. longues	
Nerf crural	hypoe excit.	hypoe excit.	inexcitab.	inexcitab.	Hypoe excitabilité à droite Inexcitabilité à gauche
Vaste interne	id.	id. (lenteur de la secousse)	id.	hypoe excit. (lenteur de la secousse)	R.D. partielle à droite R.D. complète à gauche
Nerf sciatique P. E.	inexcit.	inexcit.	inexcitab.	inexcitab.	Inexcitabilité
Nerf sciatique P. I.	id.	id.	exc. normale	normale	Inexcit. à droite normale à gauche
Triceps sural	id.	hypoe excit. (lenteur de la secousse)	hypoe excit.	hypoe excit. (lenteur de la secousse)	R.D. complète à droite R.D. partielle à gauche
Muscles antéro-externes de la jambe	id.	hypoe excit. lenteur de la secousse inversion de la formule	exc. normale	excit. normale	R.D. complète à droite R.E. normales à gauche

b) Examen par la H.-F. R.

NERFS ET MUSCLES	(volts)		(mA)		CONCLUSIONS
	TENSION H.F.	INTENSITÉ	COTE DROIT	COTE GAUCHE	
Nerf crural	500	9	hypoe excit.	inexcitab.	partielle à droite complète à gauche
Vaste interne	—	—	hypoe excit.	lenteur de la secousse	
Nerf sciatique P. E.	—	—	(secousse lente)	excit. normale	partielle à droite complète à gauche
Nerf sciatique P. I.	—	—	hypoe excit. id.	lenteur de la secousse	
Triceps sural	—	12	lenteur de la secousse	excit. normale	R. D. partielle à droite complète à gauche
Muscles antéro-externes de la jambe	—	10	lenteur de la secousse	contraction vive	R.D. complète à droite R.E. normales à gauche

On remarque les fortes intensités nécessaires pour obtenir (en réaction longitudinale même) des contractions musculaires. Cette intensité, accompagnée d'une tension H. F. de 500 volts témoigne de la gravité de l'atteinte neuro-musculaire.

II. — M... Fr..., 21 ans, (malade du Service de M. le Professeur FROMENT).

Séquelles de poliomyélite antérieure aiguë. Début en juillet 1929 par quadriplégie.

Actuellement atteinte bilatérale de nombreux muscles : deltoïde, éminence thénar, fessiers, quadriceps et adducteurs.

Nous rapportons cette observation pour montrer, dans l'examen en H. F. R. la nécessité d'opérer avec une forte tension. Nous ne signalerons que les résultats concernant les muscles de l'éminence thénar droite, les quadriceps cruraux et les adducteurs, les ayant seuls examinés par les deux méthodes.

Examen électrique le 23 janvier 1931.

a) *Examen aux condensateurs.*

NERFS ET MUSCLES	DECHARGES COURTES	DECHARGES LONGUES	CONCLUSIONS
Nerf médian au poignet	0	0	Inexcitabilité
Eminence thénar droite	0	Hypoexcitabilité lenteur de la secousse formule inversée ($P > N$)	R. D. complète
Nerf crural	0	0	Inexcitabilité
Quadriceps crural (droit et gauche)	0	Hypoexcitabilité lenteur de la secousse formule inversée ($P > N$)	R. D. complète
Adducteurs gauches	0	Hypoexcitabilité	R. D.

b) Examen par la H. F. R.

NERFS ET MUSCLES	TENSION H.F. v.	mA. i.	CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Nerf médian au poignet	300	9	0	Inexcitabilité
Eminence thénar droite	300	—	Tétanisation Lenteur secousse	R. D. certaine
Nerf crural	—	—		Inexcitabilité
Quadriceps crural	{ —	9	0	{ R. D. probable
(droit et gauche)	{ (i. maxima)	0		
Adducteurs gauches	—	—	0	R. D. probable

Cette observation, qui montre l'inexcitabilité en H. F. R. et l'excitabilité par le galvanique, n'est pas un échec de la méthode ; elle prouve seulement la nécessité d'opérer avec une tension élevée. Cet examen fut pratiqué avec un poste émetteur de T. S. F. fournissant sous 300 volts de H. F. une tension trop faible pour exciter des muscles aussi atteints que ceux du malade. Nous avons pu obtenir la contraction avec une tension beaucoup plus forte : 1.100 volts en H. F. Il est certain, d'ailleurs qu'avec un courant fourni par un poste diathermique (surtout un appareil à éclateur), nous aurions obtenu avec 9 milliampères, une contraction nette.

Signalons que nous avons mesuré la chronaxie des muscles de l'éminence thénar droite (R. D.), en commun avec M. le P^r CLUZET, à l'aide du nouveau chronaximètre à lampes de Brillouin et Zimmern. La rhéobase était de 3,5 milliampères et la chronaxie de 0,0246 sec (24,6σ).

III. — W... R..., 36 ans (malade du service de M. le P^r FROMENT).

Paralysie spinale infantile à l'âge de 3 ans.

Actuellement : paralysie complète des muscles antéro-externes de la jambe droite. Atrophie musculaire considérable.

Examen électrique le 10 mars 1931.

a) *Examen au condensateur.*

Aucune contraction ni au faradique, ni au galvanique des muscles atrophiés.

b) *Examen en H. F. R.*

Aucune contraction, quelle que soit la valeur de la tension, de l'intensité et de la longueur d'onde.

Nous rapportons là une observation à notre avis typique. Si la haute fréquence redressée est incapable de produire la moindre contraction, il faut considérer que les autres moyens d'excitation sont également impuissants à le faire. Cette absence totale de réponse à l'excitant électrique est due à une disparition anatomique complète des fibres musculaires, envahies par un processus histologique fibreux vieux de plus de 30 ans. Il ne faut pas vouloir faire rendre à une méthode plus qu'elle n'est capable de le faire.

2) **Polynévrites et paralysies infectieuses.**

Nous rapporterons, à titre d'exemple, une observation de paralysie radiale, d'origine syphilitique, que nous avons eu récemment l'occasion d'examiner.

IV. — Mme M... Alph..., 33 ans (malade du Service de M. le Pr FROMENT).

Paralysies radiale et cubitale dissociées, périphériques, radiculaires, d'origine syphilitique.

Syphilis confirmée par les épreuves sérologiques du sang et du liquide céphalo-rachidien.

Examen électrique le 19 mars 1931.

a) Examen au condensateur.

NERFS ET MUSCLES	DÉCHARGES BREVES	DÉCHARGES LENTES	CONCLUSIONS
Nerf radial	Excitab. normale	Excitab. normale	R. E. normales
Nerf cubital	—	—	
Extenseurs des doigts	—	—	
Long supinateur	—	—	} R. E. normales
Eminence hypothénar	—	—	
Court fléchisseur du pouce	Hypoexcit	Hypoexcit.	Hypoexcitabilité
Adducteur du pouce	0	Hypoexcit. Lenteur de la secousse Pas d'inversion	Forte hypoexcit.

b) Examen en H. F. R.

NERFS ET MUSCLES	TENSION H. F. v.	TENSION H. F. R. v.	i. mA	CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Nerf radial	300	60	3	vive	} R.E. normales
Nerf cubital	—	—	3-5	vive (sauf l'adducteur du pouce)	
Extenseurs des doigts	—	—	3	vive	} R.E. normales
Long supinateur	—	—	—	—	
Eminence hypothénar	—	—	—	—	
Court fléchisseur du pouce	—	—	4	vive	R. E. sensibl. norm.
Adducteur du pouce	—	—	7	tétanisante secousse lente pas d'inversion	forte hypoexc.

Ainsi les résultats sont parfaitement concordants ; seul, le muscle adducteur du pouce présente une hypoexcitabilité marquée.

Nous n'avons pas eu l'occasion d'examiner des paralysies ou des polynévrites infectieuses reconnaissant pour étiologie le saturnisme ou l'alcoolisme, mais il est à peu près évident que les résultats obtenus par la haute fréquence redressée concorderaient avec ceux fournis par les méthodes classiques.

Nous avons eu par contre, tout récemment l'occasion d'examiner un malade de la Clinique médicale de M. le P^r PIC, dont voici l'observation très brièvement résumée.

V. — M. Br... P..., 28 ans.

Accident d'automobile, le 13 octobre 1930, ayant provoqué des plaies superficielles sans gravité. Injection de 30 cm³ de sérum antiténatique. Accidents sériques frustes et passagers. Apparition brusque d'une tétraplégie, le 19 octobre 1930 ; progressivement, régression de la paralysie de certains muscles ayant suivi un traitement par des injections de strychnine.

Actuellement, paralysie complète avec grosse atrophie des muscles des épaules, des bras, des deux mains et du quadriceps crural gauche. Parésie des muscles péroniers latéraux.

Pas de troubles sensitifs.

Examen électrique le 2 mai 1931.

a) *Examen aux condensateurs.*

NERFS ET MUSCLES	COTÉ DROIT		COTÉ GAUCHE		CONCLUSIONS
	DÉCHARGES BREVES	DÉCHARGES LONGUES	DÉCHARGES BREVES	DÉCHARGES LONGUES	
Point d'Erb	hypoexcit.	hypoexcit.	normal	normal	
Nerfs du bras	normal	normal	id.	id.	
Sus épineux	0	hypoexcit. (L. S.)	normal	hypoexcit. (L. S.)	
Sous épineux	id.	id.	0	id.	R. D. complète sauf pour le sus épineux gauche (hypoexcitabilité)
Deltοide	id.	id.	id.	id.	
Biceps	id.	hypoexcit. (L. S.)	hypoexcit.	hypoexc. forte	R. D. partielle biceps droit hypoexcit. du biceps et triceps gauche
Triceps	+	+	id.	id.	Triceps droit normal
Muscles de l'avant-bras	normal	normal	normal	normal	R. E. normales
— éminence thénar	hypoexcit.	hypoexcit.	hypoexcit.	hypoexcit. (L. S.)	R. D. partielle à gauche
— éminence hypoth.	id.	id.	id.	id.	hypoexcitabilité
Nerf crural	normal	normal	hypoexcit.	hypoexcit.	hypoexcitabilité
Nerf S.P.E.	id.	id.	normal	normal	R. E. normales
Quadriceps crural	id.	id.	hypoexcit.	hypoexcit. (L. S.)	R. D. partielle
Péroniers latéraux	id.	id.	normal	normal	R. E. normales

b) *Examen en H. F. R.* (pratiqué au moyen d'un poste diathermique à lampe.

NERFS ET MUSCLES INTENSITÉ ^{mA}		COTÉ DROIT	COTÉ GAUCHE	CONCLUSIONS
Point d'Erb	6	normal	normal	R. E. normales
Nerfs du bras	id.	id.	id.	id.
Sus épineux	10	lenteur de la secousse (L.S.)	L. S.	R. D.
Sous épineux	id.	id.	secousse vive	R. D. à droite
Deltοide	id.	id.	L. S.	R. D.
Biceps	id.	(L. S.)	secousse vive	R. D. à droite
Triceps	7	secousse vive (pas de tétanisation)	secousse vive (pas de tétanisation)	hypoexcitabilité
Muscles de l'avant-bras	7	id. tétanisation	id. (tétanisation)	R. E. normales
— éminence thénar	10	secousse vive (pas de tétanisation)	L. S.	R. D. à gauche
— éminence hypoth.	id.	id.	id.	hypoexcitabilité à droite
Nerf crural	6	normal	hypoexcitab.	R. E. normales à droite
Nerf S.P.E.	id.	id.	normal	R.D. du quadriceps crur. gauche
Quadriceps crural	10	tétanisation	L. S.	
Péroniers latéraux	id.	id. tétanisation modérée		Légère hypoexcitabilité des péroniers latéraux gauches

Les résultats fournis par les deux méthodes d'examen concordent exactement. Toutes deux signalent les mêmes lésions pour les mêmes muscles.

3) Lésions traumatiques des nerfs.

Nous avons examiné quelques malades qui présentaient des lésions traumatiques des nerfs par compression ou par section.

VI. — M. G... A..., 16 ans, (malade de l'Hôtel-Dieu, Salle Ollier
Dr P. BERTRAND, chef de Clinique Chirurgicale).

Nous signalerons simplement les éléments indispensables de cette observation, celle-ci devant être publiée ultérieurement par le Dr Bertrand.

Il s'agit d'un jeune homme ayant fait une chute le 1^{er} septembre 1930, ayant provoqué une fracture à grand déplacement de la diaphyse humérale gauche. Immobilisation plâtrée effectuée sous anesthésie. Une paralysie radiale se manifeste par abcès.

Le 16 janvier 1931 nous avons l'occasion d'examiner ce blessé en commun avec M. le Pr Cluzet.

Examen électrique le 16 janvier 1931.

a) *Examen aux condensateurs.*

Cet examen montre que tous les muscles innervés par le nerf radial sont en R. D. complète, présentant une lenteur de la secousse particulièrement nette. Il n'y a pas d'inversion de la formule

b) *Examen en H. F. R.*

NERFS ET MUSCLES	TENSION H.F.V	mA i	CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Nerf radial (ds la gouttière de torsion)	300	5	légère contraction	forte hypoexcitabilité
Muscles du côté gauche (côté paralysé)	300	5	secousses de seuil lenteur de la secousse inversion de la formule	R. D.
—	—	8	tétanisation forte	R. E. normales
Muscles du côté droit (côté sain)	200	4	secousses de seuil	R. E. normales
—	200	8	tétanisation forte	Muscles plus facilement excitables qu'à gauche

La différence d'excitabilité entre les muscles gauches et droits est donc nettement décelée à la fois par l'étude des contractions liminaires et de la tétanisation.

Nous avons eu, depuis, l'occasion de suivre ce blessé. Il subit, le 4 février 1931, une intervention chirurgicale qui permit de libérer le tronc du radial macroscopiquement sain, d'un cal volumineux qui l'englobait. Nous aurons recours à cette observation dans le chapitre suivant, à propos du traitement par ce courant.

VII. — M. C... J..., 43 ans.

Fracture du coude gauche en 1914. Paralyse tronculaire radiale apparue en janvier 1931. Aucune étiologie, aucun antécédent pouvant faire penser à une cause autre que le traumatisme. Actuellement, paralyse (incomplète) des muscles extenseurs communs, cubital postérieur et abducteur du pouce. Pas de troubles sensitifs.

Examen électrique le 14 avril 1931.

a) *Examen au condensateur.*

Cet examen décèle une simple hypoexcitabilité des muscles atteints.

b) *Examen en H. F. R.*

Les muscles atteints présentent une secousse vive sous 300 volts de tension H. F. et 4 milliampères, sans lenteur de la secousse. Il y a donc hypoexcitabilité simple.

VIII. — Mlle V... (malade de l'Hôtel-Dieu, salle Lumière, D^r PEYCELON, Chef de Clinique chirurgicale).

Section traumatique, par instrument tranchant, du nerf cubital gauche au 1/3 inférieur de l'avant-bras, en novembre 1930. Infection de la plaie. Suture du nerf fin décembre 1930.

En janvier 1931 : paralysie des muscles de l'éminence hypothénar. Troubles sensitifs ou trophiques très peu accusés.

Examen électrique le 19 janvier 1931.

a) *Examen au condensateur.*

NERFS ET MUSCLES	DÉCHARGES BRÈVES	DÉCHARGES LENTES	CONCLUSIONS
Nerf cubital au-dessus de la cicatrice	contract. des fléchiss. secousse vive	contract. des fléchiss. secousse vive	Excitabilité normale
Nerf c. au-dessous de la cicatrice	inexcit. des muscles hypothénariens	inexcit. des muscles hypothénariens	Inexcitabilité
Muscles de l'éminence hypothénar	0	hypoexcitabilité lenteur de la secousse inversion de la formule	R. D. complète
Adducteur du pouce	excit. normale	excit. normale	R. E. normales

b) *Examen en H. F. R.*

NERFS ET MUSCLES	TENSION H.F. $\frac{v}{i}$	mA	CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Nerf cubital au-dessus de la cicatrice	300	3	c. vive des fléchisseurs	R. E. normales
Nerf cub. au dessous de la cicatrice	—	3	0	inexcitabilité
Muscles de l'éminence hypothénar	—	3	contraction liminaire lenteur de la secousse (Inversion de la formule) ?	R. D.
id.	—	6	tétanisation légère	
Adducteur du pouce	—	3	contraction supra-liminaire (secousse vive)	R. E. normales

Ici encore, les résultats obtenus par les deux méthodes concordent. L'opposition entre l'excitation du nerf au-dessus et au-dessous de la cicatrice met en évidence la section physiologique, et ici anatomique des cylindraxes.

IX. — M. P... J..., 37 ans. (malade du service de M. le P^r FROMENT).

Blessure de guerre par éclat d'obus du nerf cubital droit au-dessus du poignet. Atrophie des espaces interosseux et de l'éminence thénar ; paralysie de ces muscles. Quelques troubles sensitifs. Pas de troubles trophiques.

Examen électrique le 17 janvier 1931.

a) *Examen au condensateur.*

NERFS ET MUSCLES	DÉCHARGES BRÈVES	DÉCHARGES LONGUES	CONCLUSIONS
Nerf cubital (au-dessus et au-dessous de la cicatrice)	hypoexcit.	hypoexcit.	hypoexcitabilité
Muscles interosseux	id.	id.	id.
Court abducteur du pouce	hypoexcit.	hypoexcit. (secousse vive)	simple hypoexcit.
Adducteur du pouce			

b) *Examen en H. F. R.*

NERFS ET MUSCLES	TENSION mA H.F. v i		CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Nerf cubital	300	6	légère contraction	hypoexcitabilité
Muscles interosseux	—	3	seuil de contraction (secousse lente)	id.
Court abducteur du pouce	—	—		
Adducteur du pouce	—	—		
Les mêmes muscles	—	6	tétanisation	R.E. sensiblement normales

X. — M. G... Fr..., 22 ans (malade du service de M. le P^r FROMENT).

Paralysie totale du plexus brachial droit, consécutive à un éboulement survenu le 19 mars 1931, ayant traumatisé les régions axillaire et humérale supérieure. Pas de fracture. Pas de troubles sensitifs.

Paralysie de tout le membre, y compris le deltoïde.

1^{er} examen électrique le 26 mars 1931.

a) *Examen au condensateur.*

NERFS ET MUSCLES	DÉCHARGES BRÈVES	DÉCHARGES LENTES	CONCLUSIONS
Point d'Erb	hypoexcit.	hypoexcitabilité	
Nerfs médian, radial, cubital, au bras	—	—	
Deltoïde	—	excitabilité normale secousse vive pas d'inversion de la formule	R.E. sensiblement normales
Muscles du bras et de l'avant-bras	—		R.E. sensiblement normales

b) *Examen en H. F. R.*

NERFS ET MUSCLES	TENSION H. F. v	mA i	CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Point d'Erb				
	500	5	vives	R.E. normales
Troncs nerveux du bras				
Deltoïde				
	500	4	vives	R. E. sen- siblement normales
Muscles du bras et de l'avant-bras				

Il est difficile de se prononcer lors du 1^{er} examen, pratiqué seulement une semaine après le traumatisme.

Un 2^e examen électrique est fait le 13 avril 1931.

A l'examen au condensateur, les muscles apparaissent tous en R. D. partielle. En H. F. R., l'excitation se produit dans les mêmes conditions physiques que lors du 1^{er} examen, mais on note une secousse un peu traînante, si bien que les lésions semblent évoluer vers la dégénérescence, sans qu'on puisse néanmoins l'affirmer.

XI. — M. K... J..., 41 ans (malade du service de M. le Pr FROMENT).

Paralysie du plexus brachial gauche survenue le 19 mars 1931, produite par un éboulement (même accident que le malade précédent). Paralysie des muscles : deltoïde, biceps, triceps, long supinateur, radiaux, long extenseur du pouce. Pas de fracture. Pas de troubles sensitifs.

Examen électrique le 20 avril 1931.

a) *Examen aux condensateurs.*

NERFS ET MUSCLES	DÉCHARGES BREVES	DÉCHARGES LENTES	CONCLUSIONS
Point d'Erb	hypoexcit.	hypoexcitabilité	hypoexcitabilité
Troncs nerveux du bras	id.	id.	—
Biceps	hypoexcit.	hypoexcitabilité (secousse lente)	R.D. partielle
Radiaux	id.	id.	—
Deltoïde	inexcit.	hypoexcitabilité (lenteur de la secousse (pas d'inversion de la formule)	R.D. partielle
Long supinateur	id.		—
Long extenseur du pouce	id.	id.	—

b) Examen en H. F. R.

NERFS ET MUSCLES	TENSION H. F.	mA i	CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Point d'Erb	500	6	contractions biceps-radiaux sans tétanisation	hypoexcitabilité
Troncs nerveux du bras	—	—	id.	id.
Biceps			contraction sans tétanisation	hypoexcitabilité
Radiaux	—	—	(secousse vive)	
Deltoïde	—	10	contraction vive	
Long supinateur	—	—	lenteur de la secousse	R.D. partielle
Long extenseur du pouce	—	—	pas d'inversion de la formule	

Ce cas montre une discordance entre les résultats fournis par la méthode classique et ceux de la H. F. R. Pour les muscles biceps et radiaux, les condensateurs disent : R. D. partielle ; la H. F. R. répond : hypoexcitabilité, tout au plus d'ailleurs, puisqu'il n'y a pas de lenteur de la secousse. Ce fait tient simplement au grand pouvoir excitateur du courant de H. F. R. qui sollicite au maximum nerfs et muscles. Nous reviendrons d'ailleurs sur ce fait plus loin.

4) Sections tendineuses et musculaires ou sections nerveuses récentes.

L'examen électrique peut rendre service dans deux circonstances au cours de ces lésions. Ou bien l'examen peut être précoce, précédant toute intervention chirurgicale de restauration, et a pour but de confirmer ou même de mettre en évidence une section de ces organes ; ou bien, il peut être tardif, post-opératoire, destiné alors à contrôler ou à prouver leur restauration anatomique et fonctionnelle. C'est là une indication parfois essentielle à un examen électrique par un courant à la fois sensible et puissant. Si, par exemple, on doute cliniquement de

l'atteinte ou de la restauration d'un tendon ou d'un muscle (la chose est fort possible, notamment lorsque le muscle considéré fait partie d'un groupe de muscles synergiques, produisant le même mouvement), l'excitation électrique, localisée, est seule capable de procurer le renseignement cherché.

Nous citons, à titre d'exemple, le cas de deux malades atteints de section tendineuse avec plaie musculaire, que nous avons eu l'occasion de pouvoir examiner longtemps après une intervention chirurgicale curatrice.

XII. — M. Z... V..., 33 ans (malade que nous a confié M. le Pr CLUZET, pour l'examen en H. F. R.).

Accident par éboulement de mine ayant provoqué, le 19 septembre 1930, une plaie de la face postérieure du cou-de-pied. L'intervention fut pratiquée le soir même et montra une section complète du tendon d'Achille. Suture du tendon.

Examen électrique le 25 février 1931.

a) *Examen aux condensateurs.*

Cet examen n'avait montré aucune modification des réactions électriques du triceps sural. Une excitation forte du muscle provoquait une flexion du pied.

b) *Examen en H. F. R.*

L'électrode indifférente était placée sur le creux poplité, l'électrode active sur le muscle ou le tendon, au-dessus ou au-dessous de la cicatrice.

MUSCLES	TENSION H.F. ^v	mA i	CONTRACTIONS	CONCLUSIONS
Triceps sural	400	4	contraction musculaire localisée	La contraction est insuffisante pour produire un mouvement de flexion du pied.
—	600	7	tétanisation	Flexion marquée du pied sur la jambe

XIII. — M. S... L..., 18 ans (malade de MM. les P^r agrégés P. BONNET et E. POLLOSSON).

L'observation en est publiée dans le *Lyon Chirurgical* (1931, t. XXVIII, p. 195), sous le titre : « Plaie du poignet. Plaie articulaire. Section de presque tous les tendons fléchisseurs. Section du nerf cubital. Intervention immédiate. Résultat éloigné. Restauration physiologique parfaite de tous les tendons. Persistance de la paralysie cubitale ».

Le titre est suffisamment explicite pour que nous n'ayons pas à insister. Nous n'insisterons pas non plus sur les particularités indiquées par les auteurs pour l'exploration fonctionnelle des tendons fléchisseurs superficiels.

Examen électrique en H. F. R., le 27 février 1931.

NERF CUBITAL — MUSCLES	TENSION H. F. v	mA i	CONTRACTIONS	RÉSULTATS
Nerf au poignet	400	4	0	inexcitabilité
Muscles fléchisseurs superficiels	—	5	contraction vive	R.E. normales
Muscles fléchisseurs profonds	—	6	contraction en masse de tous les muscles	?
Muscles de l'éminence hypothénar	—	5	contraction lente	R. D.
Adducteur du pouce	600	4	contraction lente sous l'électrode	R. D.

Nous n'avons pas pratiqué l'exploration du nerf et des muscles par les moyens classiques ; quoiqu'il en soit, la H. F. R. a mis en évidence la restauration fonctionnelle des tendons fléchisseurs superficiels ; il nous fut impossible de nous prononcer sur l'état des tendons fléchisseurs profonds, même avec une intensité plus forte, en raison de la contraction des muscles superficiels qui masquaient celle des muscles sous-jacents ; le sujet, pusillanime, ne permettait pas, d'autre part, l'examen net des mouvements des phalanges. De toute façon, et c'est là un point suffisant, la restauration des tendons su-

perficiels était bien mise en évidence par la flexion des phalanges répondant à l'excitation portée sur le muscle lui-même.

Ces quelques observations mettent amplement en évidence la valeur très grande présentée par le courant de H. F. R. en électrodiagnostic. Il peut être mis en pratique aussi bien dans les lésions nerveuses infectieuses ou traumatiques, que dans les plaies ou section des tendons, des muscles et des nerfs.

Nous avons vu qu'avec ce courant seul il était possible de faire un diagnostic de R. D. ; nous indiquerons d'ailleurs plus loin sur quels signes nous croyons pouvoir fonder ce diagnostic. Mais il faut s'attacher à en rechercher le meilleur signe : la lenteur de la secousse. Nous croyons pour notre part que ce symptôme est au moins aussi net avec la H. F. R. qu'avec le galvanique. Nous reviendrons plus loin, en discutant la valeur de la méthode, sur les ressources qu'elle peut fournir.

§ 3. UTILISATION THERAPEUTIQUE DES COURANTS DE HAUTE FREQUENCE REDRESSES

Le dispositif utilisé pour le traitement est le même que pour le diagnostic. L'excitation a lieu soit par la méthode monopolaire, soit par la méthode bipolaire, mais de préférence par la première afin de produire une excitation plus diffuse et mieux tolérée par le muscle. Celui-ci est sollicité par des excitations isolées, courtes,

(à l'aide d'une clé de Morse) avec une intensité et une tension juste suffisantes pour produire une secousse supra-liminaire. On évitera la tétanisation qui pourrait produire des phénomènes de fatigue et peut-être même d'altération, voire même d'atrophie, des fibres musculaires. L'électrode active sera négative généralement mais on pourra prendre une électrode active positive sans inconvénient (nous ne pouvons dire, faute d'expérience, si l'électrode positive jouit du pouvoir analgésique signalé avec le courant continu).

Avec des intensités et tensions faibles, le sujet n'éprouve aucune sensation pénible, d'autant plus qu'il peut dans certains cas, présenter des troubles sensitifs lui conférant un degré d'anesthésie plus ou moins marqué. Le traitement aura lieu par séances de 5 à 10 minutes, tous les 3 ou 4 jours en moyenne. Nous n'avons pas eu l'occasion de traiter personnellement beaucoup de malades. Pour nous faire une idée des possibilités thérapeutiques offertes par ce courant nous avons traité deux malades pendant plusieurs semaines. L'un (obs. I) présentait une paralysie des membres inférieurs par atteinte de poliomyélite antérieure ; l'autre avait une paralysie radiale d'origine traumatique (obs. VI).

Le premier malade (Obs. I : paralysie des membres inférieurs consécutive à une atteinte de poliomyélite antérieure aiguë datant de trois mois) nous attira surtout par curiosité. Nous voulions voir si les seuils de la contraction musculaire se modifieraient sous l'influence du traitement. Nous avons traité ce malade par séances de 5 minutes depuis le 30 janvier 1931 jusqu'au 27 mars

1931. Nous avons rapporté précédemment les résultats de l'examen en H. F. R.; les muscles furent excités avec des intensités légèrement supra-liminaires de façon à éviter la tétanisation. Deux mois de traitement ne modifièrent en rien les caractères de la contraction, nous avons laissé le sujet au point où nous l'avons pris.

Ajoutons que cette thérapeutique fut faite en surplus du traitement par la méthode de Bordier, qui, elle aussi échoua. Il est vrai qu'il s'agissait d'une forme très sévère de poliomyélite et chacun sait d'ailleurs combien les échecs du traitement sont nombreux au cours de cette affection.

Le deuxième malade (obs. VI : paralysie radiale par compression du nerf dans un cal de la diaphyse humérale) fut traité dès la cicatrisation de la plaie après l'intervention nécessitée par la libération du nerf comprimé dans le cal.

Nous traitons ce petit blessé depuis le 27 février 1931, suivant le mode indiqué plus haut. A cette date, (3 semaines après l'intervention), tout mouvement, même de faible amplitude, était absolument impossible. Or, 3 semaines après le début du traitement (au bout de 6 séances seulement), le malade pouvait exécuter de faibles mouvements d'extension volontaire de la main et d'abduction du pouce.

Peu à peu, la récupération fonctionnelle progresse si bien que le mouvement d'extension de la main a une amplitude qui est, en mai 1931, environ la moitié de celle du côté sain, et le malade maintient fort bien sa main en extension sans se fatiguer. Parallèlement à cette récupé-

ration fonctionnelle, le volume des muscles a subi une augmentation nette si bien que l'atrophie du début a complètement disparu. Il est probable que l'amélioration continuera à s'accroître et il est possible que la récupération fonctionnelle devienne complète.

Que faut-il conclure de ces deux cas extrêmes ? Nous sommes personnellement incapables de nous prononcer nettement ; nous n'avons pas une expérience suffisante de la valeur thérapeutique de cette méthode. Nous n'avons pas pu prendre sur nos heures de recherches de laboratoire un temps suffisant pour traiter tous les malades que nous avons examinés ; nous avons suivi ces deux sujets par simple curiosité scientifique.

De toute façon, il semble que chez le malade atteint de poliomyélite antérieure, on ne puisse conclure à l'insuccès du traitement électrique puisque la méthode de Bordier fit elle aussi faillite.

Dans la deuxième observation, faut-il voir un succès du traitement électrique, ou de la libération chirurgicale du nerf ? Nous rappellerons uniquement que la récupération fonctionnelle a débuté non après le traitement chirurgical, mais après les premières séances du traitement électrique. En réalité, les deux agents thérapeutiques doivent intervenir. Il faut également savoir se rappeler que le nerf radial, plus que tout autre est susceptible de fournir de belles récupérations fonctionnelles. Il ne faut pas d'emblée vouloir attribuer à cette méthode plus qu'elle ne mérite, nous avons simplement rapporté un fait.

Des observations ultérieures nombreuses pourront seules fixer sur la valeur de ce mode de traitement.

Mais il est dès maintenant important de signaler la possibilité du traitement musculaire par un courant de haute fréquence redressé.

Il est intéressant, de plus, qu'un appareil diathermique puisse avoir une dualité de fonction et puisse réaliser deux modes de traitement bien différents.

Lorsqu'il s'agit de favoriser et d'accroître la circulation d'une région musculaire ou d'une articulation, de lutter contre des troubles circulatoires ou trophiques, il faut employer la diathermie.

Mais s'il s'agit de traiter un muscle pour aider sa récupération fonctionnelle, il suffit de modifier le courant fourni par ce poste diathermique. Adjoignons-lui purement et simplement un système redresseur à valves thermo-ioniques et nous obtiendrons un courant de haute fréquence modifié, redressé, doué d'un pouvoir excitomoteur considérable.

L'importance pratique de ce point n'échappera pas, seules de nombreuses observations pourront nous fixer sur la valeur de ce nouveau mode de traitement.

CHAPITRE II

Critique de la valeur de la méthode.

Il nous reste à donner nous-mêmes la critique de la méthode clinique que nous avons exposée, et à déterminer quels sont ses inconvénients et ses avantages, quelle est sa valeur comparativement aux méthodes classiques d'électrodiagnostic basée sur l'emploi des courants faradique et galvanique.

I. NECESSITE D'OPERER TOUJOURS DANS LES MEMES CONDITIONS

Il est évident qu'il s'agit d'une méthode donnant surtout des résultats qualitatifs qui sont fonction de l'appareil utilisé lui-même.

Une contraction musculaire sera obtenue avec des intensités très différentes suivant la tension appliquée.

C'est ainsi qu'on peut être surpris de constater qu'un même muscle, donne chez le même sujet une contraction liminaire, soit avec 0,4 milliampère soit avec 2 ou 3 milliampères suivant la valeur de la tension, ainsi que nous l'avons signalé plus haut. Ces chiffres extrêmes prouvent qu'il est impossible, si l'on n'opère pas avec des tensions analogues, de comparer les contractions obtenues avec les mêmes intensités. De la seule valeur des intensités excitatrices on ne peut déduire aucune conclusion concernant l'état fonctionnel d'un nerf ou d'un muscle. Cette notion rend impossible toute correspondance entre les intensités et les contractions qu'elles provoquent.

Pour obtenir des résultats comparables, il faut opérer toujours dans les mêmes conditions expérimentales : avec la même tension, avec le même appareillage. Ici, plus que partout ailleurs, les indications d'Erb sont extrêmement nettes et précises ; il écrit dans son « Traité d'Electrothérapie » :

« Une règle principale dont je ne saurais trop vous recommander l'observance est celle-ci : Explorez toujours suivant une seule et même méthode, et suivant un seul mode d'expérimentation ; choisissez toujours le même procédé ; il faudrait même, si c'était possible, employer sans cesse les mêmes appareils... ».

C'est, dans le cas présent, une indication formelle : il faut, pour avoir des résultats comparables, opérer toujours avec le même appareillage.

Les appareils différents donnent des tensions différentes qu'il est peu facile, en pratique, de ramener toujours à la même valeur. Si les tensions sont inégales, des intensités égales donneront sur le muscle sain, et à plus forte

raison sur le muscle malade, des résultats tout à fait différents, de sorte qu'il sera impossible d'avoir un point de comparaison et de juger la valeur fonctionnelle d'un nerf ou d'un muscle..

Des appareils différents peuvent donner des fréquences différentes. C'est là un fait peu important en lui-même sur l'excitation neuro-musculaire, mais qui peut devenir extrêmement gênant dans l'appréciation des intensités. Nous avons vu, en effet, (mesure des intensités des courants de H. F. R.), que des variations de fréquence des courants pouvaient modifier complètement (par excès ou par défaut) (skin-effect), les indications fournies par les milliampèremètres électromagnétiques, appareils montés couramment sur les appareils ordinaires de haute fréquence ou sur le redresseur. Il est bien connu, de plus, qu'un milliampèremètre pour haute-fréquence, qu'il soit électromagnétique ou thermique, doit être construit et étalonné pour une gamme de fréquences déterminées ; il ne s'agit pas d'appareils passe-partout pouvant s'adapter à tous les postes générateurs de haute-fréquence.

D'ailleurs, l'intensité indiquée par le milliampèremètre (surtout électromagnétique), est déjà assez entachée d'erreurs, pour les raisons indiquées précédemment (cf « mesure des intensités »), pour qu'on n'ait pas à accroître les difficultés d'appréciation des contractions.

Somme toute, on ne pourra comparer les résultats de l'électrodiagnostic fournis par cette méthode que si les conditions expérimentales sont les mêmes : usage du même appareil, tensions voisines, fréquences semblables.

C'est à cette condition qu'un praticien pourra obtenir des indications précieuses pour l'électrodiagnostic.

II. COMPARAISON DES CONTRACTIONS OBTENUES PAR CETTE METHODE ET LES METHODES CLASSIQUES DE L'ELECTRODIAGNOSTIC

Ces réserves étant faites, il faut que cette méthode affronte la comparaison avec les procédés classiques de l'électrodiagnostic clinique. Celui-ci repose sur l'emploi des courants faradique et galvanique ou sur l'usage des condensateurs (méthode du P^r Cluzet), donnant des temps de décharges bref ou longs et que l'on considère comme analogues aux deux courants précédents.

Il faut d'ailleurs se rappeler que la différence entre les courants faradique et galvanique n'est pas une différence de nature, mais bien une différence quantitative dans la durée du courant.

Les résultats fournis par l'examen en haute fréquence redressée concordent, nous l'avons vu, avec ceux des méthodes ordinaires.

1) Comparaison de la valeur diagnostique des courants de H. F. R. et faradique.

a) « *Les courants de H. F. R. font contracter le muscle ou excitent le nerf dans tous les cas où le courant faradique, fourni par une bobine médicale, agit sur ces organes.* ». Toutes les observations précédemment rapportées confirment ce fait.

b) Dans certains cas, la *H. F. R.* peut produire une contraction musculaire là où le faradique n'a aucune action. L'observation XI, par exemple, pour ne citer qu'elle, en est un exemple. Il s'en suit que le diagnostic de l'état fonctionnel d'un nerf ou d'un muscle peut s'en ressentir. L'absence d'excitabilité ou la présence d'une forte hypoexcitabilité au faradique peut faire conclure à l'existence d'une R. D. partielle ou totale (s'il y a, en outre, lenteur de la secousse), tandis qu'avec la *H. F. R.*, en accroissant les valeurs de la tension et de l'intensité appliquées, on arrive très souvent à obtenir une belle et vive contraction.

Faut-il, devant tant de cas, prôner la valeur excitatrice très supérieure du courant de haute fréquence redressée ? Nous ne le croyons pas pour la raison suivante. On sait que l'inexcitabilité faradique n'est que relative à l'instrument utilisé (en général une bobine dite « médicale »). Or, plusieurs auteurs, notamment MM. Delherm et Laquerrière en donnèrent, en 1911-1912, une nouvelle preuve, en faisant reparaitre une excitabilité faradique disparue, en soumettant les tissus à des modifications électromiques, ainsi que le rappelle d'ailleurs Laugier dans sa thèse. — Il faut donc admettre qu'il n'y a pas de véritable inexcitabilité faradique, et en utilisant des bobines d'induction plus fortes, on peut reculer les limites de l'inexcitabilité faradique. Nous rappelons simplement cette possibilité d'action différente du courant d'induction, mais nous n'avons comparé les résultats de la *H. F. R.* qu'avec ceux fournis par le courant faradique (issu d'une bobine médicale) ou avec ceux fournis par des décharges brèves des condensateurs.

Si nous proposons nous-mêmes la restriction mentionnée plus haut (parce que nous n'avons pas fait d'examen avec des bobines plus fortes), nous sommes néanmoins persuadés que les courants de haute fréquence redressés ont une action plus considérable sur les nerfs et les muscles que le courant faradique fourni par des « bobines à type médical ».

L'action plus efficace des courants de haute fréquence redressés, la tétanisation forte qu'ils donnent (tétanisation en général plus forte que celle produite par le faradique) font que ces courants rendent plus de service que les courants fournis par les bobines. Ils sont à préférer lorsqu'on cherche à obtenir une tétanisation forte, notamment en cas d'examen de la continuité d'un tendon (diagnostic de section ou résultat éloigné de la suture).

D'ailleurs, il faut bien remarquer que la restriction concernant les possibilités de diagnostic par le courant faradique, décrite par MM. Delherm et Laquerrière, citée par Laugier et que nous rapportons nous-mêmes est renforcée par le parallèle que nous établissons entre les résultats fournis par les deux courants.

Si le courant faradique n'a pas d'action sur un nerf ou un muscle malade, c'est que, au moins dans la plupart des cas, les quantités d'électricité induites sont insuffisantes, sans plus ; le courant de H. F. R. fournit des quantités d'électricité plus grandes en raison de la plus grande fréquence et de la sollicitation énorme à laquelle elle soumet les muscles ; c'est là la cause de sa supériorité sur le faradique ; elle permet ainsi de reculer les limites de la méthode d'exploration par le faradique.

Si la H. F. R. n'excite pas le nerf ou ne fait obtenir

qu'une faible contraction musculaire, il y a certainement une atteinte très grave du nerf qui sera confirmée par l'examen direct du muscle. Toutes nos observations concordent sur ce point : « *L'inexcitabilité du nerf ne s'est rencontrée que dans les cas de R. D., totale ou partielle, s'accompagnant de lenteur de la secousse* ».

C'est là, tout au moins il nous l'a semblé, un test très précieux faisant augurer certainement et exactement de la valeur du nerf et du muscle.

2) **Comparaison de la valeur diagnostique des courants de H. F. R. et galvanique.**

a) Nous avons toujours constaté, et nos observations le prouvent, que dans tous les cas où le courant galvanique provoque la contraction musculaire, le courant de H. F. R. la produit aussi. — « *Cette méthode n'est jamais en défaut vis-à-vis du galvanique* ».

b) Dans certains cas, *le courant galvanique peut produire une secousse lente par excitation directe du muscle*, tandis que la haute fréquence redressée occasionne dans les mêmes conditions une secousse vive. L'observation XI en fournit un exemple très net. L'examen électrique des muscles biceps et radiaux donne en effet les résultats suivants :

Faradique	{	nerfs musculo-cutané et radial : hypoexcitabilité	
		muscles biceps et radiaux :	id.
Galvanique	{	nerfs :	id.
		muscles :	id. avec secousse lente

H F R.	{	nerfs :	hypoexcitabilité (pas de tétanisation pour 500 volts et 6 milliampères)
		muscles :	hypoexcitabilité, <i>secousse vive</i> sans tétanisation

Avec la méthode classique, il faut dire: R. D. partielle.

Avec l'examen par la H. F. R., on ne peut dire que : hypoexcitabilité.

A quel résultat faut-il ajouter foi ? Nous pouvons essayer de trouver une explication en invoquant les conceptions pathogéniques de la réaction de dégénérescence, et en cherchant les facteurs qui provoquent l'apparition d'une secousse lente.

BOTAZZI, Mlle YOTEYKO admettent la contractilité propre du sarcoplasma, de sorte qu'une contraction musculaire normale est la somme de deux contractions élémentaires, de caractères différents : La substance myofibrillaire donnerait une contraction rapide, tandis que le sarcoplasma se contracterait lentement. Cette théorie est entachée de grosses erreurs.

Elle repose tout d'abord sur une observation erronée de Fano. Cet auteur enregistrait les contractions isolées de l'oreillette de tortue et constatait que la courbe présentait des oscillations lentes, sur lesquelles se greffaient les contractions propres de l'oreillette. Pour lui, ces deux sortes d'oscillations à rythme rapide ou lent relevaient respectivement des contractions des myofibrilles et du sarcoplasma.

Cette interprétation fut reconnue fausse lorsqu'on prouva que dans l'oreillette de la tortue, à côté des fibres myocardiques, existe un muscle lisse superposé.

Strumpell constata, d'autre part, que les muscles présentant la R. D. ne sont pas toujours altérés profondément.

M. le Professeur Cluzet constata avec Rispal, deux ou trois mois après la section du nerf sciatique chez le chien, l'intégrité des striations longitudinale et transversale du muscle jambier antérieur, bien que ce muscle présentât la R. D.

Dans d'autres cas, la R. D. apparaissait dix jours seulement après la section du nerf, bien que l'examen histologique ne pût mettre en évidence la moindre atteinte visible du muscle.

BABINSKI se basa sur ces faits et sur des observations personnelles pour émettre son hypothèse pathogénique de la R. D., donc de la lenteur de la secousse. Cet auteur signale avoir constaté, dans des cas de paralysie faciale, la R. D. quatre jours après la section du nerf.

Il semble donc bien que la R. D. se produit avant la dégénérescence des fibres musculaires ; elle ne serait que « la réaction propre des fibres musculaires » (Babinski).

D'ailleurs, on constate expérimentalement que l'injection des substances qui rompent l'isochronisme du nerf et du muscle, en agissant sur l'un ou l'autre de ces organes par l'augmentation ou la diminution de la chronaxie (curare, spartéine, strychnine, vératime, scopolamine), permet d'observer une secousse musculaire lente, galvanotonique même, comme dans les cas cliniques de R. D.

Il résulte de tous ces faits que la secousse lente du muscle semble bien refléter la contraction idiopathique

des fibres musculaires, qui ne sont plus sous la dépendance des filets nerveux.

Pouvons-nous expliquer dans notre cas clinique l'existence d'une secousse lente avec le courant galvanique et d'une secousse vive avec la H. F. R. Il est probable que le pouvoir excitant des courants de H. F. R. est supérieur à celui du courant galvanique. Cette supériorité d'action serait due, selon nous, à la tension considérable du courant de H. F. R. et aux intensités fortes (10-15 milliampères) que l'on peut impunément appliquer aux muscles examinés, le sujet n'éprouvant pas de gêne marquée d'une excitation aussi forte.

D'ailleurs, il faut considérer que la contraction lente, obtenue avec le courant galvanique, l'est avec une intensité qui ne peut guère dépasser 10 milliampères ; si l'on s'élève au-dessus de cette valeur, le courant galvanique produit en effet une sensation vive de brûlure. Il est donc permis de considérer qu'il serait possible d'obtenir, avec le courant galvanique, une secousse plus vive si l'on pouvait employer une intensité plus forte que 10 milliampères.

La lenteur de la secousse, la réaction de dégénérescence ont donc, suivant les conditions d'examen, leurs limites reculées proportionnellement aux valeurs de la tension et de l'intensité du courant de H. F. R. appliqué. C'est, à notre avis, cette différence des conditions d'examen dans les deux méthodes qui provoque une discordance (qui peut n'être qu'apparente) entre les résultats obtenus.

III. LES COURANTS DE HAUTE FREQUENCE REDRESSÉS PEUVENT-ILS NE PAS PRODUIRE LA CONTRACTION MUSCULAIRE ?

Pour que l'absence de réponse musculaire à cet excitant soit complète, il faut qu'il y ait une véritable disparition des fibres musculaires. *Il s'agit alors de processus dégénératifs extrêmement anciens où le tissu myo-fibrillaire est histologiquement remplacé par un tissu fibreux dépourvu de tout pouvoir contractile.*

C'est, par exemple, le cas rapporté plus haut (obs. III) où il s'agissait d'une paralysie reconnaissant pour étiologie une poliomyélite antérieure datant de 30 ans. Il s'agissait d'une inexcitabilité absolue du muscle ; aucun courant électrique n'était d'ailleurs capable de produire la moindre excitation.

De cette rapide comparaison, il ressort donc nettement que « les courants de haute fréquence redressés produisent des excitations dans tous les cas où les autres modes d'excitation électrique sont actifs ; qu'ils reculent les limites de la réaction de dégénérescence et qu'ils restent impuissants à provoquer la contraction, uniquement dans les cas où les fibres musculaires ont histologiquement disparu ».

IV. RESULTATS FOURNIS PAR CETTE METHODE D'ELECTRODIAGNOSTIC

Les résultats fournis sont uniquement qualitatifs ; il est impossible, en effet, de fournir, même pour les mus-

cles normaux, un tableau de concordance entre les valeurs des intensités et les caractères des secousses qu'elles produisent, en raison des conditions trop différentes des examens (nature de l'appareil, valeur de la tension. Dans les cas pathologiques il nous a semblé qu'il était possible de dégager quelques règles précisant la valeur fonctionnelle des muscles atteints.

Il est évident que l'exploration peut et doit, dans certains cas, être faite avec les méthodes d'excitation monopolaire et bipolaire.

1. Inexcitabilité absolue.

Inexcitabilité du nerf et du muscle, quelles que soient les conditions d'examen (intensité, tension) ou la méthode (monopolaire, bipolaire, longitudinale).

2. Réaction de dégénérescence complète.

Inexcitabilité du nerf.

Contraction lente du muscle par excitation directe et de courte durée (avec hyper ou hypoexcitabilité du muscle).

Tétanisation difficilement obtenue, même avec des durées longues d'excitation (une forte tension est nécessaire ; au moins 8 à 900 volts).

3. Réaction de dégénérescence partielle.

Hypoexcitabilité du nerf.

Contraction lente du muscle par excitation directe et de courte durée (avec hypo ou hyperexcitabilité du muscle).

Tétanisation facilement obtenue par simple augmentation de la durée d'excitation.

Notons d'ailleurs que les signes secondaires observés dans les réactions de dégénérescence partielle ou complète peuvent s'observer par ce mode d'examen, c'est-à-dire qu'il est possible d'avoir l'inversion de la formule et le déplacement du point moteur vers le tendon du muscle.

Et ce n'est pas là un des moindres avantages de la méthode que de pouvoir faire un diagnostic avec une seule méthode. Il est essentiel, nous le répétons, d'opérer toujours avec le même appareil, dans les mêmes conditions et de comparer l'excitation des muscles malades avec les muscles sains de l'autre côté ou tout au moins avec des muscles sains du sujet examiné.

Un intérêt pratique important est à notre avis, comme nous l'avons déjà dit, de pouvoir transformer instantanément un appareil diathermique, quel qu'il soit, en un poste d'électrodiagnostic par la simple adjonction d'un redresseur à valves thermo-ioniques.

V. SENSIBILITE DE LA METHODE COMPARAISON AVEC LA METHODE DE MESURE DE LA VITESSE D'EXCITABILITE

Nous avons indiqué, au début de ce chapitre, que les renseignements cliniques fournis par cette méthode sont uniquement qualitatifs, et cela pour deux raisons :

La variabilité considérable des conditions d'examen (tension, intensité, fréquence), l'imprécision inévitable des mesures d'intensités en haute fréquence enlèvent toute possibilité d'exactitude absolue, de sorte qu'il est impossible de confectionner un barème des intensités appliquées et des contractions, mêmes normales, y répondant.

La méthode présente, comme toutes celles de l'électro-diagnostic, le défaut de ne pas pouvoir évaluer les simples hypoexcitabilités musculaires.

Ces lacunes opposent ce nouveau procédé d'électro-diagnostic à la méthode de la mesure de la vitesse d'excitabilité. Un rapide parallèle entre les deux s'impose.

1. Au début des lésions dégénératives du nerf.

A ce stade des lésions dégénératives nerveuses, la sensibilité des deux méthodes est toute différente.

La méthode de la vitesse d'excitabilité possède une grande précision, permettant la mesure véritable de l'indice de vitesse. La recherche de la chronaxie neuro-

musculaire permet dans tous les cas de faire avec une grande précocité le diagnostic de lésion dégénérative et de mesurer l'intensité du processus dégénératif.

Les méthodes d'électrodiagnostic classique sont incapables de procéder à une « mesure » de la lésion nerveuse. Elles mettent en évidence, soit par la connaissance des intensités nécessaires pour produire l'excitation, soit par comparaison avec des muscles homologues, sains, l'existence d'un certain état d' « *hypoexcitabilité* », et la seule précision de ces méthodes consiste à dire si l'hypoexcitabilité est faible ou forte. C'est là évidemment une imprécision gênante qui ne permet pas d'accorder à l'électrodiagnostic une sensibilité bien grande.

2. Au cours des lésions dégénératives avancées du nerf.

A ce stade les méthodes s'opposent et forment un contraste encore très net ; la méthode de mesure de la chronaxie possède alors une sensibilité très diminuée.

Laugier, dont la thèse résume et couronne, par sa contribution personnelle, les beaux travaux de Weiss, Lapicque, Doumer, Cluzet et d'autres, écrit : « Tant que les vitesses d'excitabilité restent normales ou relativement élevées, l'indice est un réactif très sensible des altérations que subit la vitesse ; mais, lorsque celle-ci devient très faible, l'indice n'en est plus qu'une mesure très peu sensible. Nous avons vu par exemple que, lorsque les chronaxies atteignent des valeurs de 0,01, il faut des variations de vitesse considérables pour produire

des variations de l'indice dépassant l'approximation de sa mesure ; on voit qu'à ce niveau l'indice n'est plus un réactif ni très fidèle ni très sensible pour suivre l'évolution du paramètre chronologique de l'excitation. »

Laugier lui-même conseille alors de ne pas avoir recours à la mesure de la chronaxie au cours des états dégénératifs avancés, présentant la R. D.

C'est à ce stade, au contraire, que les méthodes habituelles de l'électrodiagnostic prennent toute leur valeur. S'il est difficile d'employer, pour elles, l'expression trop physique de sensibilité, il est néanmoins facile de reconnaître qu'il devient possible de préciser, en gros, l'état d'un nerf par ces méthodes. Les états de R. D. partielle ou complète sont facilement reconnaissables avec certitude, et c'est là un point parfois essentiel en pratique. Il n'est pas plus question qu'au début des processus dégénératifs, de mesurer l'intensité de la lésion, mais la précision obtenue est suffisante pour les besoins de la clinique.

* *

La méthode d'électrodiagnostic basée sur l'excitation par les courants de haute fréquence redressés donne donc en définitive des résultats précieux à condition d'opérer toujours dans des conditions d'examen semblables. Elle ne peut prétendre atteindre la précision, au début des processus dégénératifs nerveux, tout comme les autres méthodes de l'électrodiagnostic ; mais elle permet de faire un examen électrique d'un nerf atteint par

un processus dégénératif avancé avec une précision suffisante. Elle offre la possibilité de reconnaître les états d'hypo ou d'hyperexcitabilité, et de réaction de dégénérescence, partielle ou totale. Un des avantages les plus appréciables de cette nouvelle méthode électrique, diagnostique et thérapeutique est de nécessiter un simple poste diathermique, appareil très répandu actuellement, et un redresseur de courant à valves thermoioniques.

Nous avons simplement voulu, en ces quelques pages, signaler les applications cliniques possibles des courants de haute fréquence redressés; l'avenir nous dira si elles sont susceptibles d'être accrues.

PLANCHE I



Tracé des contractions de fermeture et secousses d'ouverture
(gastrocnémien de grenouille) obtenus avec un courant de H. F. R.
Tension H. F. 300 v. $i = 5$ mA. $\lambda = 420$ m.

PLANCHE II



Tracé des contractions de fermeture et secousses d'ouverture
(gastrocnémien de grenouille) obtenus par un courant de H. F. R.

Tension H. F. = 500 v. $i = 6$ mA. $\lambda = 420$ m.

PLANCHE III



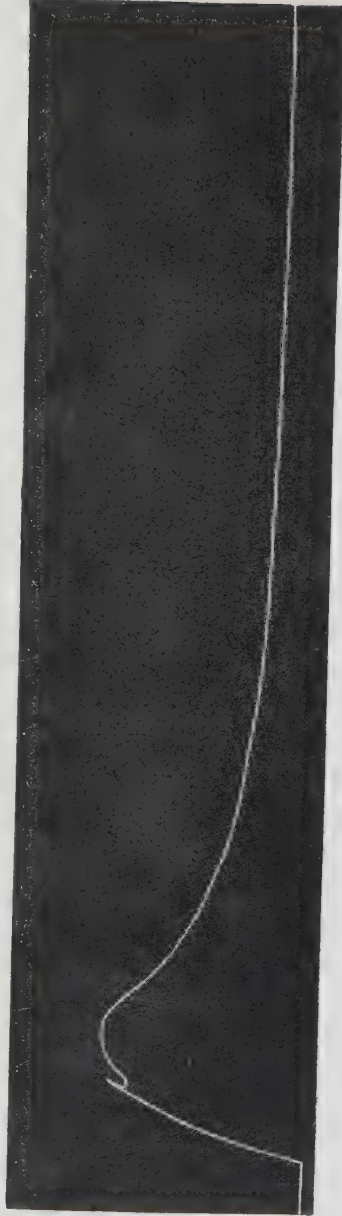
Tétanisation de gastrocnémien de grenouille produite par un passage continu
du courant de H. F. R.

Tension H. F. = 500 v. i. = 6 mA. λ = 460 m. f. = 20 sec.

PLANCHE IV

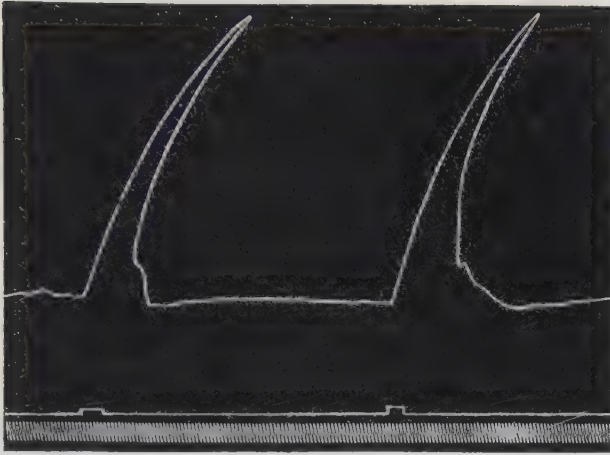


Tracé 1 : Tétanos parfait dû au courant faradique (5 cm. de distance des bobines)
 $t = 2$ minutes 30 secondes.



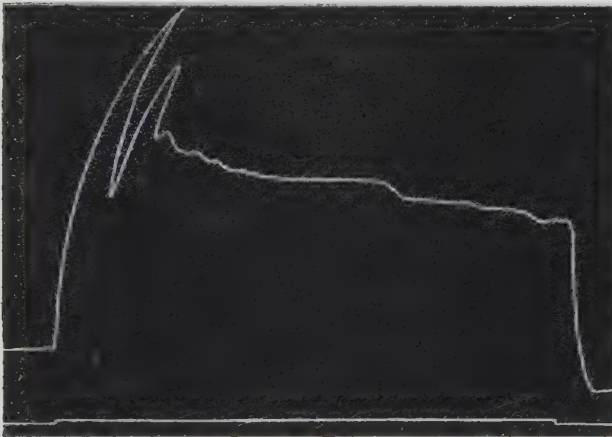
Tracé 2 : Tétanos parfait dû au courant de H. F. redressé.
Tension H. F. = 200 v. $i = 5$ mA. $t = 2$ m. 30 sec.

PLANCHE V



Tracé 1 : Contraction de fermeture des muscles de l'éminence
thénar de l'homme par un courant de H. F. R.

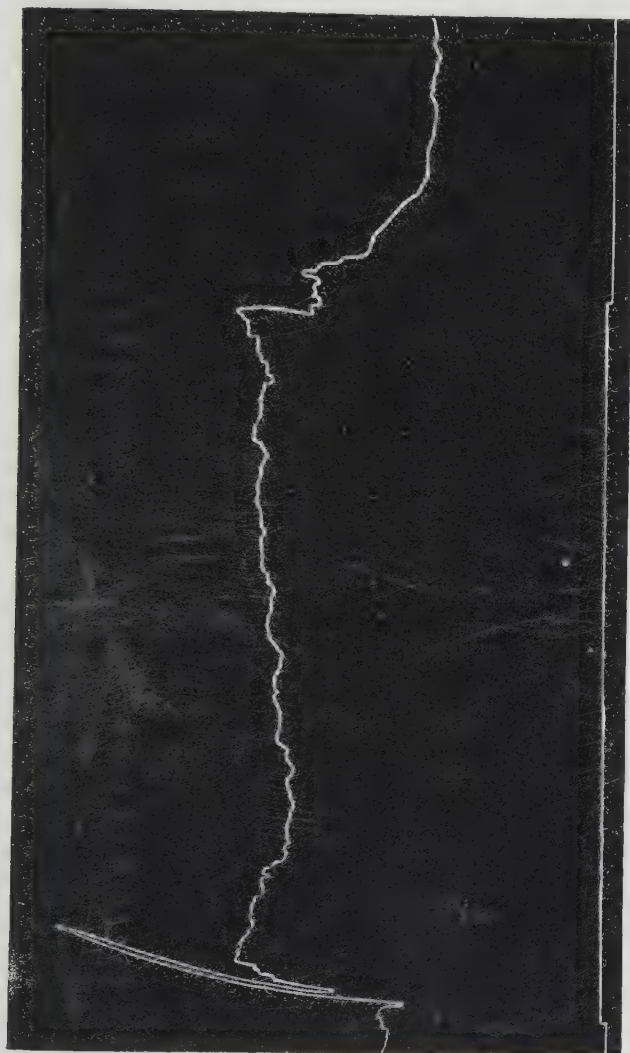
Tension H. F. = 200 v. $i = 2 \text{ mA}$ $\lambda = 400 \text{ m.}$



Tracé 2 : Tétanisation de muscles de l'éminence thénar de
l'homme (H. F. R.).

Tension H. F. = 350 v. $i = 8 \text{ mA.}$ $\lambda = 450 \text{ m.}$
Temps de passage du courant, 4 sec.

PLANCHE VI



Tétanisation des muscles de l'éminence thénar de l'homme, par un courant de H. F. R.
Tension H. F. = 350 v. $i = 8$ mA. $\lambda = 450$ m., durée de l'excitation 30 sec.

PLANCHE VII



Tracé 1 : Excitation du cœur de grenouille par la H. F. R. (intensité juxta-liminaire 0,2 milliampère). Dans la première partie du tracé : extra-systoles et repos compensateurs consécutifs ; remarquer la diminution d'amplitude des contractions. — Dans la deuxième partie du tracé apparaît la trémulation fibrillaire du cœur, allant jusqu'à l'arrêt complet.



Tracé 2 : Excitation du cœur de grenouille par la H. F. R. (intensité fortement supra-liminaire, 3 milliampères). — La première partie du tracé montre des extra-systoles suivies de longs repos compensateurs. — La seconde partie montre le tétanos de tonicité du cœur.

CONCLUSIONS

I. — Les courants de haute fréquence redressés furent décrits par MM. Cluzet et Chevallier en 1925 pour la première fois. Tous les appareils générateurs de haute fréquence (dispositifs de d'Arsonval, appareils diathermiques à éclateur ou à lampe, postes émetteurs de T. S. F.) peuvent être utilisés pour leur obtention.

Le polymorphisme des courants de H. F. R. est donc le même que celui des courants de haute fréquence et il sera nécessaire de les caractériser qualitativement (par la forme de leurs ondes et la valeur relative des temps de silence) et quantitativement (par la mesure de leur fréquence, tension et intensité).

II. — LE REDRESSEMENT des courants de haute fréquence peut s'obtenir par différents dispositifs mais il faut seulement retenir comme procédé pratique de redressement les valves thermoioniques à deux ou trois électrodes, c'est-à-dire les kénotrons (adaptés à la tension qu'ils doivent supporter) et les lampes à trois électrodes, trans-

formées en valves par branchement de la grille à la plaque. Le courant redressé peut utiliser une seule ou les deux alternances du courant primitif, suivant le montage des valves thermo-ioniques, en série ou en pont.

III. — L'ÉTUDE OSCILLOGRAPHIQUE des courants diathermiques redressés et à ondes entretenues montre *qu'en basse tension* ces courants sont formés d'ondes distinctes les unes des autres, sur toute leur hauteur, quand le circuit d'utilisation est ouvert ou très résistant ; mais ces ondes redressées s'élargissent et s'unissent les unes aux autres d'autant plus près de leur sommet que la résistance du circuit d'utilisation diminue. Quand les ondes de haute fréquence s'unissent à leur sommet même, on n'a plus qu'une onde de basse fréquence redressée à chaque période du courant alternatif du secteur alimentant le poste générateur.

Cette étude montre qu'en plus *haute tension*, les ondes restent toujours distinctes les unes des autres, indépendamment de la valeur de la résistance du circuit d'utilisation et qu'elles ne disparaissent jamais.

IV. — 1° Les PROPRIÉTÉS PHYSIQUES des courants de haute fréquence redressés sont dues à leur origine oscillatoire (notamment en ce qui concerne leur pouvoir thermogène) et à leur polarité, ces courants étant capables de produire l'électrolyse, de charger un condensateur, d'exciter un tube à rayons X et d'influencer les appareils de mesure polarisés.

2° La MESURE des courants de haute fréquence redressés doit porter sur trois facteurs :

1. La fréquence est non pas calculée à partir de la formule de Thomson mais déduite de la mesure de la fréquence du courant de haute fréquence, par un ondemètre à absorption.

2. La tension est mesurée par un ~~voltmètre électro-~~statique ou un spintermètre micrométrique, l'emploi de l'oscillographe cathodique restant un procédé de laboratoire.

3. L'intensité, dont la mesure comporte une erreur obligatoire, sera obtenue par des ampèremètres électromagnétiques (non shuntés et prévus pour une gamme de fréquences déterminées) ou par des appareils thermiques (à fil dilatable simple — à thermo-couple dans le vide) ou par les phénomènes électrolytiques.

V. PHYSIOLOGIQUEMENT, les courants de haute fréquence redressés possèdent un *pouvoir excito-moteur* considérable.

L'étude myographique des contractions isolées du gastrocnémien de grenouille ou des muscles de l'homme par des durées courtes d'excitation, met en évidence l'existence d'un plateau entre la contraction de fermeture et la secousse d'ouverture, et l'apparition d'une contraction succédant à la secousse d'ouverture.

L'étude myographique des contractions obtenues par des durées prolongées d'excitation montre que les muscles sont contractés en une tétanisation forte pendant tout le temps de passage du courant.

Cette étude permet de comparer ces contractions avec celles que fournissent le courant galvanique (qui n'excite

pas le muscle en dehors de ses périodes variables) et le courant faradique (qui ne provoque pas de contracture après la secousse d'ouverture).

L'amplitude de l'intensité des contractions musculaires varie dans le même sens que l'intensité, la fréquence et le voltage du courant de haute fréquence redressé.

La loi des secousses de Pflüger s'observe avec les contractions dues à ce courant.

VI. — L'étude de l'influence SUR LE CŒUR des courants de haute fréquence redressés montre que :

1° Avec des courants d'intensité liminaire, des excitations de courte durée provoquent des extra-systoles pendant la phase diastolique, tandis que des excitations de longue durée amènent la fibrillation du myocarde.

2° Avec des courants d'intensité fortement supra-liminaires, des excitations de courte durée provoquent des extra-systoles pendant la phase diastolique, suivies d'un repos compensateur particulièrement long, tandis que des excitations de longue durée amènent la téτανisation du myocarde.

VII. — Il est possible d'appliquer la propriété excitomotrice des courants de haute fréquence redressés à L'ÉLECTRODIAGNOSTIC des affections neuro-musculaires. On peut dégager des résultats obtenus quelques règles permettant d'obtenir tous les résultats fournis par les autres méthodes d'électrodiagnostic reposant sur l'emploi des courants galvanique et faradique ou sur les décharges de condensateurs (méthode du P^r Cluzet).

On constate que :

1° Les courants de H. F. R. agissent dans tous les cas où le courant galvanique excite les muscles.

2° Les courants de H. F. R. peuvent produire la contraction musculaire alors que le courant galvanique est incapable de le faire.

Il semble que cette nouvelle méthode d'électrodiagnostic présente un intérêt particulier en raison des trois points suivants :

1. Elle fournit les mêmes renseignements que les méthodes usuelles de l'électrodiagnostic.

2. Elle recule les limites de l'inexcitabilité neuro-musculaire.

3. Elle produit des contractions isolées ou la tétanisation des muscles sans s'accompagner de phénomènes douloureux (sauf toutefois si le voltage du courant est trop élevé).

VIII. — Les courants de haute fréquence redressés peuvent être utilisés en THÉRAPEUTIQUE pour la récupération fonctionnelle des nerfs et des muscles.

Suivant les indications fournies par la clinique, il y aura lieu de procéder au traitement par la production de contractions distinctes, sans tétanisation, ou au contraire par la production de la tétanisation.

Il faut retenir en outre l'avantage précieux de cette méthode diagnostique et thérapeutique de pouvoir être

appliquée avec un appareil diathermique, capable par suite de remplir deux rôles différents dans le traitement des affections neuro-musculaires : diathermique et excitomoteur.

Vu :

LE DOYEN,
Jean LEPINE.

LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE,
J. CLUZET.

Vu et permis d'imprimer :

Lyon, le 15 mai 1931.

LE RECTEUR, PRÉSIDENT DU CONSEIL DE L'UNIVERSITÉ,
J. GHEUSI.

BIBLIOGRAPHIE

Nous ne rapportons que les références concernant les ouvrages ou les articles originaux ayant été nécessaires à la rédaction de ce travail. Cette bibliographie comporte par suite des lacunes sur certaines questions — étude des courants de haute fréquence à ondes entretenues produits par les oscillateurs à lampe, théorie de l'excitation neuro-musculaire, par exemple — ; mais nous avons cru ne devoir rapporter que les ouvrages ou mémoires que nous avons lus et auxquels nous avons emprunté un fait ou un chaînon de raisonnement.

Nous classons les références selon les trois parties de notre thèse.

PREMIERE PARTIE

(Etude physique des courants de H. F. R.).

La bibliographie concernant les courants de H. F. R. est composée d'articles signés CLUZET et CHEVALLIER, ou CLUZET et PONTIUS, ou PONTIUS.

D'ARSONVAL. — L'échauffement des tissus par les courants de haute fréquence. *C. R. Ac. Sc.*, CLXXXV, 324, 1927, et 740, 1927.

BERCHÉ. — Pratique et théorie de la T. S. F. (Paris, 1930).

BERGONIÉ et TURPAIN. — Sur les mesures des courants de haute fréquence en électricité médicale. *Arch. Electr. Méd.* (A. E. M.), 1908, 635-655.

BORDIER. — Diathermie et diathermothérapie (Paris, 1928).

— Sur la chaleur dégagée par la d'Arsonvalisation diathermique au moyen d'électrodes spongieuses. Graves inconvénients de ces électrodes. *C. R. Ac. Sc.*, CLXXXVI, 540 ; 1928.

— Sur les appareils de diathermie à ondes entretenues. Le triodiathermique de Bordier. *A. E. M.*, 1929 ; 78.

BETHENOD. — Appareils de mesure des courants alternatifs de faible intensité. *Bulletin Off. Soc. Fr. des Electriciens*, IV, 470 ; 1925 (4^e série).

A. BROCA. — Sur le pouvoir inducteur spécifique des métaux. *C. R. Ac. Sc.*, CXL, 1677 ; 1905.

— Pouvoir inducteur spécifique et conductibilité. Viscosité électrique. *C. R. Ac. Sc.*, CXLII, 1328 ; 1906.

A. BROCA et TURCHINI. — Résistance électrique des fils métalliques pour les courants électriques de haute fréquence. *C. R. Ac. Sc.*, CXIL, 1238 ; 1905.

— Résistance des électrolytes par les courants de haute fréquence. *C. R. Ac. Sc.*, CXLI, 1187 ; 1906.

CHANOZ. — Quelques considérations physiques sur les courants de haute fréquence utilisés en médecine sous forme de d'Arsonvalisation. *Lyon Médical*, 1906 (II), 192-203.

— Contribution à l'étude de la polarisation électrique des tissus. *Annales d'Electrobiologie et de Radiologie*, 1910 ; 1-175-244.

— Sur l'étude analytique de l'action physico-chimique de l'électricité sur les tissus. *Ann. d'Elect. et de Radiol.*, 1910 ; 299-312.

- Considérations sur l'action thermique de l'électricité traversant les tissus vivants. *Congrès Intern. d'Elect. et Radiol.*, Barcelone, 1910, in *Ann. Elect. et Rad.*, 1911*, 21-39 et 93-105.
- CLUZET. — Précis de Physique Médicale (Paris, 1929).
- CLUZET et CHEVALLIER. — Sur les courants de haute fréquence et de sens constant, leurs effets physiologiques. *C. R. Ac. Sc.*, CLXXXI, 890 ; 1925.
- Premières recherches sur les courants de haute fréquence redressés. *A. E. M.*, 1926 ; 65-72.
- Sur la mesure et le mode d'action des courants de haute fréquence redressés. *A. E. M.*, 1928, 339-341.
- CLUZET et PONTIUS. — Sur l'étude oscillographique des courants de haute fréquence redressés et capables de produire des phénomènes d'excitation. *C. R. Soc. Biol.*, CV, 645 ; 1930.
- Sur l'étude oscillographique des courants de haute fréquence redressés. *A. E. M.*, 1931, 66-72.
- EBBECKE. — Modification des membranes et excitation nerveuse. *Arch. gén. Phys.*, CXCV, 555-587 ; 1922.
- DUFOUT. — Sur un oscillograhe cathodique. *C. R. Ac. Sc.*, CLVIII, 1339 ; 1914.
- Oscillographe cathodique. *Journ. de Phys. et de Rad.*, 1920 ; 147.
- Oscillographe cathodique pour l'étude des basses moyennes et hautes fréquences (Paris, 1923, Chiron éd.).
- Sur l'enregistrement des oscillations électromagnétiques de grande fréquence (fréquences hertziennes). *C. R. Ac. Sc.*, CLXXVIII, 1478 ; 1924.

La bibliographie étrangère concernant le tube de Braun et l'oscillographe cathodique figure dans Kathodenoszillograph (von P^r Mathias et von D^r Ing. Gabor) édité par Verlag der Vereinigung der Elektrizitätswerke e. V. (Berlin), et comporte 58 références (outre celles de Dufour) étagées de 1897 à 1927.

DUFOUR et MESNY. — Etude oscillographique de quelques émetteurs à triode. *L'onde électrique* 1923 (II), 620.

FABRY. — Sur le calcul de la chaleur dégagée par les courants de haute fréquence. *C. R. Ac. Sc.*, CLXXXV, 684 ; 1927.

GAIFFE. — Sur les méthodes et instruments de mesure dans l'application et la production des courants de haute fréquence. *A. E. M.*, 1907, 523 et 584.

GIROZ. — Les redresseurs à vapeur de mercure. *Bulletin Off. Soc. Fr. des Electriciens*, 3^e série, X, 375 ; 1920 ; et 4^e série, IV, 463 ; 1924.

C. GUTTON. — La lampe à trois électrodes, Paris, 1929. (Les Presses Universitaires de France). *Ce livre contient la bibliographie de cette question jusqu'en 1927.*

HOLLER. — Analyse des oscillations produites par une triode. *Electrician*, LXXXIX, 537 ; 1922.

H. OLLIVIER. — Cours de Physique générale (Paris, 1927).

PEROT. — Enregistreur photographique et oscillographe. *C. R. Ac. Sc.*, CLXXX, 130 ; 1925.

PONTHUS. — Sur le pouvoir thermogène des courants de H. F. et de H. F. R. *Soc. de Biologie*, séance du 15 juin 1931 (sous presse).

ROUGE. — Etude sur les valves à courant thermo-ionique. *Radio-électricité*, 1921, 222-228.

WALTER. — Quelques indications sur la mesure des intensités en haute fréquence. *Bull. Off. Soc. d'Elect. et Rad. Méd.*, 1927, 34.

DEUXIEME PARTIE

(*Etude physiologique des courants de H. F. R.*).

Théorie de l'excitabilité neuro-musculaire.

ASHER. — Relation entre l'excitabilité nerveuse et la fréquence des excitations. *Skand. Arch. Phys.*, XLIII, 6-12.

BATTELLI et STERN. — La contracture par électricité. Contracture par les courants alternatifs. *C. R. Soc. Biol.*, LXXXVI, 920 ; 1922.

BERITOFF. — Sur la contracture et le tétanos des muscles striés. *Arch. gén. Phys.*, CXCVIII, 590-603 ; 1923.

CARDOT et LAUGIER. — Excitation des nerfs par ouverture des courants galvaniques. Décalage de l'excitation d'ouverture sous l'action de passages de courants antérieurs (courant ascendant). *C. R. Soc. Biol.*, LXXXIII, 167 ; 1920.

CHALLIOL et LAQUERRIÈRE. — Action du courant galvanique constant sur les tissus sains et malades. Rapport au Congrès de Londres, in *Journ. Radiol.*, 1922 ; 271.

CLUZET et CHEVALLIER. — Effets moteurs et sensitifs produits par certains courants de haute fréquence. *C. R. Soc. Biol.*, CXXIII, 1308 ; 1925.

— Sur l'excitation des nerfs et des muscles au moyen des courants de haute fréquence redressés. *C. R. Soc. Biol.*, XCIV, 528 ; 1926.

CLUZET et PONTIUS. — Actions diathermiques et excito-motrices produites au moyen des postes d'émission de télégraphie sans fil. *C. R. Soc. Biol.*, CVI, 655 ; 1931.

— Sur l'influence de la longueur d'onde dans les actions excito-motrices produites par les courants de haute fréquence redressés. *C. R. Soc. Biol.*, CVII, 155 ; 1931.

- Action des courants de H. F. R. sur le cœur de grenouille. *Soc. de Biol.*, Séance du 15 juin 1931 (sous presse).
- ERB. — Traité d'électrothérapie. Trad. française, Rueff, 1884.
- Ph. FABRE. — Théorie cinétique de l'excitation neuro-musculaire par ondes brèves. *C. R. Soc. Biol.*, CLXXXVII, 482 ; 1928.
- HEDON. — Précis de physiologie. (Paris, 1926).
- HÖFER. — Zeitschrift f. Phys., XLV, 261-284 ; 1927.
- VON KRIES. — Sur l'action d'ondes électriques brèves sur les tissus excitables, en particulier sur le nerf moteur. *Archiv für die gesammte Physiologie*, CLXXVI, 302-326 ; 1919.
- LAPICQUE. — Considérations préalables sur la nature du phénomène par lequel l'électricité excite le nerf. *Journ. Phys. et Path. gén.*, 1907, 565.
- Sur la théorie de l'excitation électrique. *C. R. Ac. Sc.*, CXLVI, 1054 ; 1908.
- Conditions physiques de l'excitation électrique étudiées sur un modèle hydraulique de la polarisation. *Journ. Phys. et Path. gén.*, 1909, 1009-1024 et 1035-1046.
- (M. et M^e L.). L'addition latente et ses rapports avec le paramètre chronologique de l'excitabilité. *C. A. Ac. Sc.*, CL, 796 ; 1910.
- Sur la théorie de l'addition latente. *Ann. Phys. et Physicoch. biol.*, 1925 (I), 132-150.
- LASAREFF. — Théorie ionique de l'excitation des nerfs et des muscles. *Archiv. für die Gesammte Physiologie*, CXXXV, 196-204 ; 1910.

- Sur la théorie physico-chimique de l'activité nerveuse. *Riv. di Biol.* 1926 (VIII), 638-657.
- Théorie ionique de l'excitation des tissus vivants. Paris, 1928 (Blanchard éd.).
- LAUGIER. — Vitesse d'excitabilité et courants induits. Méthodes nouvelles en électrodiagnostic. Thèse Paris, 1913.
- La théorie de l'excitation et l'efficacité des ondes en échelons. *C. R. Soc. Biol.*, LXXXVI, 712 ; 1922.
- KEITH LUCAS. — Période réfractaire du muscle et du nerf. *Journ. of Physiology*, XXXIX, 331-340 ; 1909.
- Recherches sur la sommation du muscle et du nerf par des stimuli sous-liminaires dans l'excitation électrique. *Journ. of Physiol.*, XXXIX, 461-475 ; 1909.
- KEITH LUCAS et BRAMWELL. — Rapport de la période réfractaire avec la perturbation propagée dans le nerf. *Journ. of Physiol.*, XLII, 495-511 ; 1911.
- NAGELSMIDT. — Effets thermiques produits par les courants de haute fréquence sur l'organisme. *A. E. M.*, 1910, 161-173.
- Discussion du rapport précédent au Congrès de Physiothérapie, *A. E. M.*, 1910, 280-287.
- NERNST et BARATT. — Sur l'excitation par les courants électriques. *Zeitschr. f. Elektrochemie*, XXXV, 664 ; 1904. .
- NERNST. — Théorie du courant électrique. *Archiv. f. die Gesamte Physiologie*, CXXII, 275-314 ; 1908.
- NOGIER. — Physiothérapie-Electrothérapie (Lyon, 1917).
- OZORIO DE ALMEIDA. — Sur la théorie de l'addition latente. *Ann. Physio et Physicoch. biol.*, 1926 (II), 103-128.
- RICHTER Ch. — Travaux de laboratoire de Marcy, 177, t. III.

- RSHEVKIN et MALOV. — Excitation du muscle par ondes à haute fréquence. *Pflüger's Archiv. f. Physiologie*, 1928, 708-715.
- STROHL. — Mesure d'excitation par des courants présentant une variation brusque d'intensité. *C. R. Soc. Biol.*, LXXXVI, 170 ; 1922.
- Etude comparée de l'excitation électrique par des courants d'intensité constante ou à brusque variation. *C. R.*, LXXXVI, 173 ; 1922.
- STROHL et FABRE. — Sur l'efficacité comparée des ondes cunéiformes et des ondes rectangulaires. *C. R. Soc. Biol.* XCII, 219 ; 1927.
- K. TIGERSTEDT. — Action de la température et de la fréquence d'excitation sur la fatigue du nerf à myéline de grenouille. *Centralblatt f. Physiologie*, XXV, 911-914 ; 1911.
- TURELL. — L'action physico-chimique des courants interrompus, et leur relation avec leurs effets thérapeutiques. *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, XX, 103-117 ; 1926 (vol. 2).
- VORONTZOFF. — Sur la durée d'excitation des nerfs. *C. R. Soc. Biol.*, LXXVIII, 109 ; 1915.
- ZIMMERN. — *Eléments d'électrothérapie clinique*, Paris, 1906.

TROISIEME PARTIE

(*Applications cliniques des courants de H. F. R.*).

- CLUZET. — Condensateur à capacité variable pour l'électrodiagnostic, *Lyon médical*, 1910 (I), 890.
- Electrodiagnostic au moyen des décharges de condensateurs. *Journ. Rad. et d'Electr.*, II, 121-128 ; 1914-15.
(*Nous n'indiquons ici que le premier article et un autre*

où la méthode de notre Maître est complètement exposée, pris parmi beaucoup d'autres qui couronnent l'étude théorique de la loi d'excitation par les décharges de condensateurs et le rapport au Congrès de Barcelone, 1911).

*CLUZET et CHEVALLIER. — Application des courants de haute fréquence redressés à l'électrodiagnostic. *Soc. Méd. des Hôp. de Lyon*, in *Lyon Médical*, 1926 (I), 289.

— Tétanisateur à haute fréquence redressée. Nouvel appareil électrothérapique. *A. E. M.*, 1926, 353.

— Sur l'examen et le traitement au moyen des ondes de haute fréquence, entretenues et redressés. *Communication au troisième Congrès Intern. de Radiologie*. Paris, juillet 1931 (sous presse).

DOUMER. — Les causes d'erreur en électrodiagnostic. *Ann. d'Electrobiol.*, XIV, 1-20 ; 1911.

STROHL. — Rapport sur les méthodes nouvelles d'électrodiagnostic. *Journ. de Radio. et Electro.*, VI, 375 ; 1922.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	11
--------------------	----

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER. — PRODUCTION DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE	19
<i>Généralités</i>	19
<i>Le dispositif de d'Arsonval</i>	23
<i>Les appareils diathermiques à éclateur. Ondes peu amorties</i>	27
<i>Appareils diathermiques à lampes triodes. Ondes « entretenues »</i>	29
<i>Les appareils émetteurs de T. S. F. Ondes rigoureusement entretenues</i>	42
<i>Mode de captation des courants de haute fréquence</i>	51

CHAPITRE II. — REDRESSEMENT DES COURANTS DE	
HAUTE FRÉQUENCE	55
<i>Généralités. Définition</i>	55
<i>Tension, intensité et fréquence en haute fréquence redressée</i>	57
<i>Les dispositifs redresseurs en haute fréquence</i>	59
Redresseurs n'utilisant pas l'effet Edison	60
Redresseurs utilisant l'effet Edison	61
<i>Montages redresseurs</i>	64
Redressement avec utilisation d'une seule alternance	64
Redressement avec utilisation des deux alternances	67
CHAPITRE III. — ETUDE OSCILLOGRAPHIQUE DES	
COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS..	71
<i>L'oscillographe cathodique de Dufour.....</i>	71
<i>Enregistrement des courants diathermiques avant et après redressement</i>	82
<i>Enregistrement oscillographique des courants de haute fréquence à ondes rigoureusement entretenues</i>	97
CHAPITRE IV. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES COURANTS DE H. F. R.	101
<i>Propriétés physiques dues à l'origine oscillatoire des courants de H. F. R.</i>	102

<i>Propriétés physiques dues à la polarité des courants de H. F. R.</i>	117
--	-----

CHAPITRE V. — MESURE DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS	123
<i>Mesure de la fréquence</i>	124
<i>Mesure de la tension</i>	127
<i>Mesure de l'intensité</i>	132

DEUXIEME PARTIE

<i>Effet physiologique caractéristique des courants de H. F. R.</i>	143
--	-----

CHAPITRE PREMIER. — EFFETS SENSITIFS, VASO-MOTEUR ET CALORIFIQUE DES COURANTS DE H. F. R.	147
---	-----

CHAPITRE II. — EFFETS MOTEURS DES COURANTS DE H. F. R.	155
<i>Etude de la contraction musculaire isotonique</i>	155
<i>Courbes isotoniques obtenues chez la grenouille</i>	156
<i>Courbes isotoniques obtenues chez l'homme</i>	162
<i>Action des courants de H. F. R. sur les organes vitaux et sur les nerfs après la mort</i>	166
<i>Action sur le cœur des courants de H. F. R.</i>	169

CHAPITRE III. — CAUSES DE L'EXCITATION NEURO-	
MUSCULAIRE PAR LES COURANTS DE H. F. R.	175
<i>Polarisation électrique des tissus</i>	178
<i>Sommation des excitations</i>	183
<i>Etat variable de l'intensité excitatrice</i>	190

CHAPITRE IV. — FACTEURS DE LA CONTRACTION	
MUSCULAIRE PAR LES COURANTS DE H. F. R.	193
<i>Influence de l'intensité</i>	194
<i>Influence de la tension appliquée</i>	197
<i>Influence de la longueur d'onde</i>	203

TROISIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER. — APPLICATIONS DIAGNOS-	
TIQUE ET THÉRAPEUTIQUE DES COURANTS DE	
HAUTE FRÉQUENCE REDRESSÉS	211
<i>Technique d'un électrodiagnostic</i>	211
<i>Utilisation diagnostique des courants de H.</i>	
<i>F. R.</i>	215
<i>Utilisation thérapeutique des courants de</i>	
<i>H. F. R.</i>	236
CHAPITRE II. — CRITIQUE DE LA VALEUR DE LA	
MÉTHODE	241
<i>Nécessité d'opérer toujours dans les mêmes</i>	
<i>conditions</i>	241

<i>Comparaison des contractions obtenues par cette méthode et les méthodes classiques d'électrodiagnostic</i>	244
<i>Les courants de H. F. R. peuvent-ils ne pas produire la contraction musculaire ?</i>	251
<i>Résultats fournis par cette méthode d'électro- diagnostic</i>	251
<i>Sensibilité de la méthode. Comparaison avec la méthode de mesure de la vitesse d'excita- bilité</i>	254
CONCLUSIONS	259
BIBLIOGRAPHIE	265

IMPRIMERIE DE TRÉVOUX.

===== G. PATISSIER =====

===== TRÉVOUX (AIN) =====

